



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

도시계획학 석사 학위논문

실시간 고속도로 혼잡판단

지표 및 알고리즘 구축

Construction of index and algorithm for
real-time highway congestion detection

2018 년 02 월

서울대학교 환경대학원

환경계획학과 교통학 전공

이 진 수

국문초록

고속도로 혼잡을 완화하기 위해 인프라 확충보다 운영관리 측면의 접근이 대두되었다. 운영관리 측면의 혼잡완화를 위해 고속도로의 소통상황을 진단하고 파악하기 위해 지능형 교통체계(ITS; Intelligent Transport System)를 구축 및 운영하고 있다. 고속도로 지능형 교통체계는 지점기반의 수집시스템이 주를 이루고 있다. 지점기반 수집시스템은 경로 및 공간의 교통류 특성 및 소통상황을 분석하는데 한계가 있고, 해당 지점의 정보만을 생성한다는 한계가 있다. 따라서 한국도로공사는 구간검지 시스템을 31개 노선, 3,790km 연장, 3~6km 간격으로 고속도로 전역에 설치 및 운영 중이다. 현재 고속도로 혼잡관리는 지점검지 시스템에서 수집된 자료를 통해 이루어지고 있는 실정이다. 구간단위의 혼잡관리 및 고속도로 전역을 영향권으로 모니터링하기 위해서는 구간검지 자료의 사용은 필수적이다.

구간검지 시스템의 검지차량은 각기 고유한 ID를 갖고 있어, 차량의 연속적인 주행특성 분석이 가능하다. 본 연구에서는 개별차량의 주행행태에 따라 각기 다른 희망주행속도를 혼잡판단 지표에 적용하였다. 개별차량의 희망주행속도는 해당 차량이 유지하고 싶은 희망속도(Desired speed)로 개별차량의 특성을 내포한다. 본 연구의 혼잡판단 지표는 개별차량 속도감소율 지표(VSRI; Vehicle Speed Reduction Index)로 설정하였으며, 개별차량 희망주행속도 대비 현재구간의 주행속도의 감소율로 표현된다. VSRI는 개별차량의 특성이 반영되어 버스, 화물차, 저속주행 차량의 구성비에 관계없이 일정한 수준 상태의 혼잡을 검지 할 수 있다. 특히 구간의 연속적인 소통상황을 표현 할 수 있고, 구간에 따른 혼잡의 행태 분석이 가능하며, 고속도로 전역에 적용 가능하다는 장점이 있다. 또한 본 연구에서 제시한 혼잡판단 알고리즘은 고속도로 전역의 혼잡판단 지표를 생성하는데 1분주기 집계 기준 약 2.44초로 실제 시스템에 적

용이 가능하도록 설계하였다.

본 연구에서 개발한 지표의 성능을 평가하기 위해 특정 구간의 혼잡 판단 및 예측분석을 수행하였다. 분석결과 혼잡은 대부분 엇갈림구간(JC 및 IC)에서 먼저 발생되어 상류부 기본구간으로 전이되는 행태를 보였다. 혼잡의 예측은 먼저 혼잡이 발생된 엇갈림구간의 혼잡검지시각, 전이된 상류부 기본구간의 혼잡 발생시각, 엇갈림구간의 연장을 변수로 수행하였다. 두 구간의 혼잡검지시각으로 산출된 혼잡전이 속도를 통해 이전 상류부 기본구간의 혼잡 발생시각을 예측한 결과 구간검지 시스템의 설치 간격이 조밀할수록 그 오차는 적은 것으로 분석되었다.

본 연구는 구간검지 시스템 자료를 통해 구간의 혼잡을 실시간으로 판단하고 연속적인 혼잡의 전이행태를 실제 데이터 기반으로 분석했다는 데 그 의의가 크다. 본 연구에서 사용한 구간검지 시스템 자료는 표본의 자료이기 때문에 표본율에 가장 적은 영향을 받는 속도기반 지표를 활용하였다. 향후 구간검지 시스템의 검지율이 100%에 도달 한다면 속도지표 뿐만 아니라 교통량, 밀도, 구간점유율 등 다양한 지표를 활용하여 개선된 혼잡판단 지표를 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 구간검지, 실시간, 혼잡판단 지표, 혼잡전이, 혼잡예측

학 번 : 2016-24834

목 차

I . 서론	1
1. 연구의 목적 및 필요성	1
2. 연구의 범위 및 내용	2
1) 연구의 범위	2
2) 연구의 내용	2
II . 선행연구의 고찰	4
1. 선행연구의 고찰 및 시사점	4
1) 혼잡의 정의	4
2) 거시적 혼잡관련 지표	6
3) 미시적 혼잡 판단 방법론	10
2. 본 연구의 차별성	13
III . 연구방법론	14
1. 연구방법론의 개요	14
2. 실시간 혼잡판단 지표 설정	15
1) 개별차량 희망주행속도 산출	22
2) VSRI 산출	23
IV . 지표의 기준 및 경계 설정	25
1. 자료	25
2. 개별차량 희망주행속도 산정기준 비교	26

1) 개별차량의 희망주행속도 산출(최대값 기준)	26
2) 개별차량의 희망주행속도 산출(평균값 기준)	28
3) 개별차량의 희망주행속도 산출(중위값 기준)	29
4) 개별차량의 희망주행속도 산출결과 비교	31
3. VSRI의 혼잡 경계 설정	33
1) 도로용량편람의 서비스수준	34
2) 목표 혼잡경계 시점 도출	35
3) VSRI의 혼잡경계	37
V. 지표의 활용	39
1. 가정	39
1) 데이터 무결성(Data Integrity) 보장에 대한 가정	39
2) 혼잡의 전이 행태에 대한 가정	39
2. 실시간 혼잡판단 알고리즘 구축	40
1) 분석경로 설정 단계	41
2) 실시간 데이터 수집 및 구축	42
3) 대상구간의 자료여부 확인	42
4) 차량ID 매칭을 통한 방향성 확인	43
5) VSRI 산출	44
3. 혼잡판단 및 예측	45
1) 분석경로1(동탄JC - 기흥동탄IC)	46
2) 분석경로2(동탄JC - 기흥동탄IC)	51
3) 분석경로3(옥산JC - 목천IC)	55
VI. 결론	58

1. 결론	58
2. 연구의 시사점 및 한계점	60
3. 연구의 향후 활용방안	62
1) 실시간 혼잡판단 알고리즘(VSRI) 가동	63
2) 엇갈림구간 혼잡 발생	63
3) 기본구간 혼잡 발생	63
■ 참고문헌	64

표 목 차

<표 1> 혼잡의 정의	5
<표 2> 거시적 혼잡관련 지표(지표)	8
<표 3> 거시적 혼잡관련 지표(시사점)	9
<표 4> 미시적 혼잡판단 방법론	12
<표 5> 개별차량 희망주행속도 분포도(최대값 기준)	27
<표 6> 개별차량 희망주행속도 분포도(평균값 기준)	28
<표 7> 개별차량 희망주행속도 분포도(중위값 기준)	30
<표 8> 개별차량 희망주행속도 산정 기준별 표준편차	32
<표 9> 고속도로 기본구간 서비스수준별 밀도 및 밀도비	34
<표 10> 일자별 구간점유차량대수 임계값 및 혼잡경계값	36
<표 11> 일자별 혼잡시점에 따른 VSRI 값	38

그 립 목 차

<그림 1> 연구의 흐름도	3
<그림 2> 진출이 확인되지 않은 개별차량 사용시	16
<그림 3> 진출이 확인된 개별차량만 사용시	17
<그림 4> 구간검지체계	18
<그림 5> 검지차량의 방향성이 확인된 경우	18
<그림 6> 검지차량의 방향성이 확인되지 않은 경우	19
<그림 7> 인접한 구간의 통행속도 산출 개념도	20
<그림 8> 인접하지 않은 구간의 통행속도 산출 개념도	20
<그림 9> 실시간 혼잡판단지표(VSRI) 산출 과정	22
<그림 10> DSRC 원시자료의 구조	25
<그림 11> 시간대별 VSRI(최대값 기준)	27
<그림 12> 시간대별 VSRI(평균값 기준)	29
<그림 13> 시간대별 VSRI(중위값 기준)	30
<그림 14> 일자별 희망주행속도 표준편차	33
<그림 15> 혼잡경계 시점 도출	37
<그림 16> 실시간 혼잡판단 알고리즘	40
<그림 17> 분석경로 설정	41
<그림 18> 실시간 데이터 수집	42
<그림 19> 대상구간의 자료여부 확인	42
<그림 20> 대상구간의 자료 차량 ID 매칭 과정	43
<그림 21> 매칭 정보가 존재하지 않는 경우	43

<그림 22> 매칭 정보가 존재하는 경우	44
<그림 23> 분석경로 설정	45
<그림 24> 분석경로1(동탄JC - 기흥동탄IC)	46
<그림 25> 혼잡검지시점 분석결과(분석경로1 상행_2015.06.01 월)	47
<그림 26> 상류부 혼잡예측(분석경로1 상행_2015.06.01 월)	48
<그림 27> 혼잡검지시점 분석결과(분석경로1 하행_2015.06.01 월)	49
<그림 28> 상류부 혼잡예측(분석경로1 하행_2015.06.01 월)	50
<그림 29> 분석경로2(북천안IC - 안성IC)	51
<그림 30> 혼잡검지시점 분석결과(분석경로2 상행_2015.06.28 일)	52
<그림 31> 상류부 혼잡예측(분석경로2 상행_2015.06.28 일)	53
<그림 32> 혼잡검지시점 분석결과(분석경로2 하행_2015.06.09 화)	54
<그림 33> 분석경로3(옥산JC - 목천IC)	55
<그림 34> 혼잡검지시점 분석결과(분석경로3 상행_2015.06.16 목)	56
<그림 35> 혼잡검지시점 분석결과(분석경로3 하행_2015.06.30 화)	57
<그림 36> 실시간 혼잡관리 모니터링 시스템	62

I. 서론

1. 연구의 목적 및 필요성

교통혼잡을 완화하기 위한 대체도로의 건설 및 확장사업은 재원조달이 어렵다. 또한 계획부터 건설완료시 까지 상당한 시간이 소요됨에 따라 인프라 확충보다 운영관리 측면의 접근이 대두되었다. 이에 따라 정부는 1999년 교통체계효율화법의 ‘교통체계의 지능화’ 부문을 제정하고 현재 까지 지능형 교통체계(ITS; Intelligent Transport System)를 구축 및 운영하고 있다.

현재 고속도로 지능형 교통체계는 VDS(Vehicle Detection System), CCTV(Closed Circuit Television)와 같은 영상식 지점기반의 수집시스템이 주를 이루며, 이 수집 데이터를 활용하여 대상 지점의 소통상황을 수집 및 제공하고 있다. 지점기반 수집시스템은 경로(Path) 및 공간(Space)의 교통류 특성 및 소통상황을 분석하는데 한계가 있고, 고속도로 전역의 정보를 생성할 수 없다. 이를 극복하기 위해 한국도로공사는 구간검지 시스템을 적용하여 고속도로의 차량용 단말기(하이패스)와 노변기지국(RSE; Road Side Equipment 이하 RSE)간 근거리 전용통신(DSRC; Dedicated short-range communication 이하 DSRC) 시스템을 통해 하루에 약 백만대 차량의 주행궤적 자료를 수집·저장하고 있다. DSRC 시스템은 한국도로공사 관리의 31개 노선 3,790km에 설치되어 있으며, 설치간격은 3~6km 로 민자 고속도로를 제외한 전역에 설치되어 있다. 이 같은 구간검지 시스템의 장점에도 불구하고 DSRC 수집 자료를 통해 각 구간의 소통상황 정보를 생성하지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 구간검지 자료수집 시스템에서 실시간으로 혼잡을 인식 할 수 있는 정교한 혼잡판단 지표 및 알고리즘을 구축하였으며, 구간 단위의 혼잡 인식 및 예측 방법을 제시하였다.

2. 연구의 범위 및 내용

1) 연구의 범위

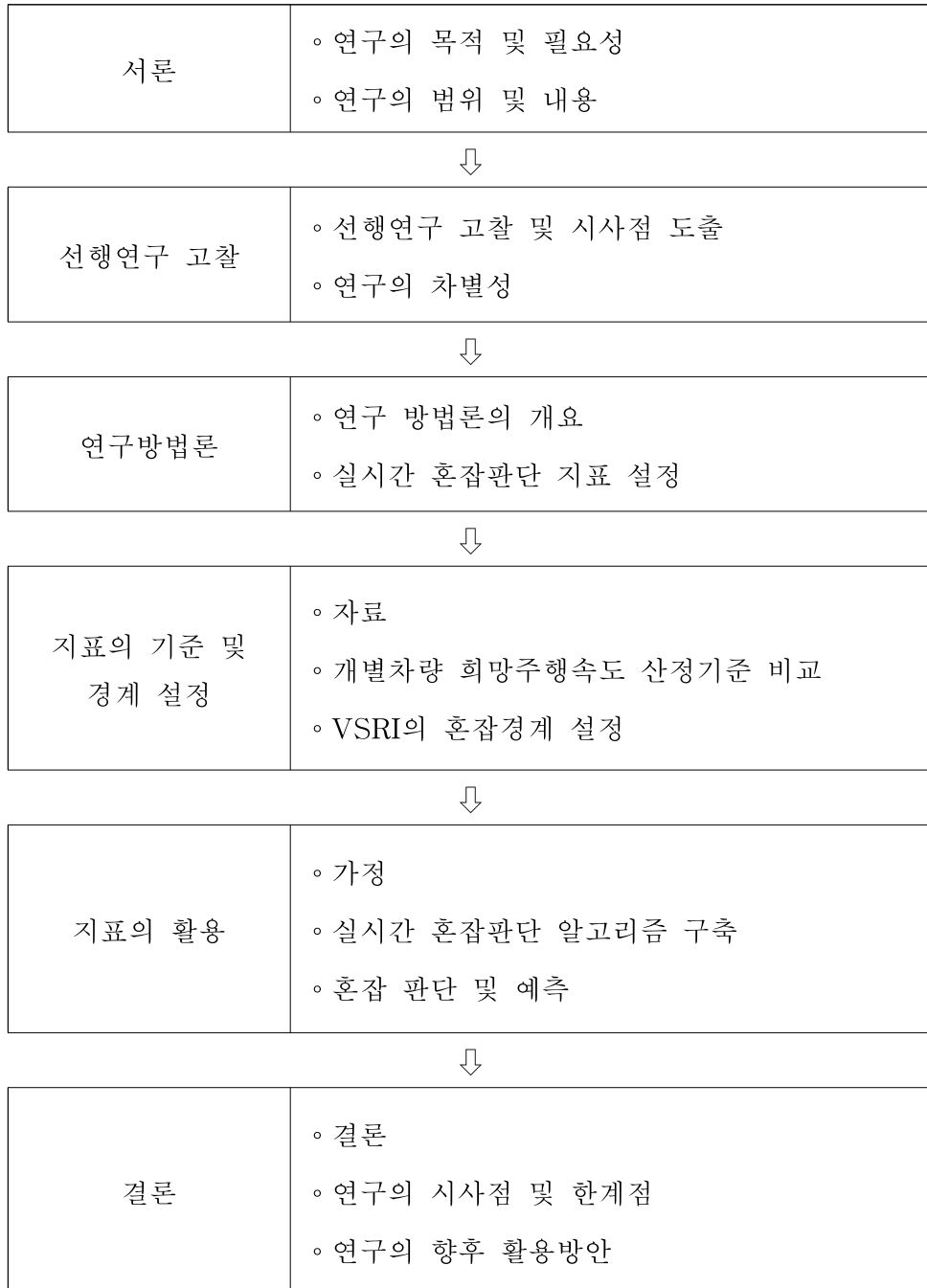
본 연구는 구간검지 시스템(DSRC)이 운영되고 있는 고속도로 노선 중 경부고속도로를 대상으로 연구를 수행하였다. 경부고속도로는 연장 416.6km로 구간별 왕복 6차로~왕복 10차로로 구성되어 있다. 최저 제한속도는 50km/h로 전 구간 동일하며, 구간별 최고 제한속도는 양재IC~천안IC 110km/h, 천안IC~영천IC 100km/h, 영천IC~언양JC 80km/h, 언양JC~구서IC 100km/h로 설정되어 있다. 2015년 기준 경부고속도로 본선 내 설치된 RSE 검지기는 총 106개로 평균 3.9km 간격으로 분포되어 있다. 본 연구의 공간적 범위는 경부고속도로 양재IC~남이JC에 설치되어 있는 36개의 RSE 검지기가 분포되어 있는 118.2km 구간을 대상으로 설정하였다. 36개의 RSE 검지기로 구성되는 구간은 총 35개 구간으로 서울 → 부산, 부산 → 서울 양방향을 고려하면 총 70개 구간의 분석이 가능하다.

구득한 2015년의 DSRC 자료 중 본 연구의 공간적 범위(양재IC~남이JC)내 70개 구간의 자료 누락이 최소인 6월 총 29일(6월 15일 자료 누락)으로 설정하였다.

2) 연구의 내용

본 연구에서는 실시간 고속도로 혼잡판단 지표를 설정하기 위해 선행연구를 통해 혼잡의 정의에 대해 고찰하고 구간단위의 소통상황을 대표하기 위한 혼잡을 재정의 하였다. 또한 현재까지 진행된 연구를 통해 혼잡 및 소통상황을 판단하기 위한 지표들을 고찰하였으며, 구간검지 시스템에 실시간으로 적용 가능한 혼잡판단 지표를 정립하였다. 추가적으로 본 연구에서 구축한 지표를 통해 고속도로의 효율적인 운영관리를 도모하기 위한 실시간 혼잡관리 모니터링 시스템을 제안하였다.

<그림 1> 연구의 흐름도



II. 선행연구의 고찰

1. 선행연구의 고찰 및 시사점

과거 혼잡과 관련된 연구는 혼잡의 정도를 표현하기 위해 다양한 지표를 개발하였으나 대부분의 지표는 특정 시간대(첨두시, 비첨두시) 혹은 전일에 걸친 수집 자료를 통해 산출되는 지표로 일정 기간의 혼잡을 거시적으로 설명하고 있다. 즉, 기존 연구의 지표를 통해 현재 고속도로 주요 혼잡지역의 소통상황 정보를 미시적으로 생성 및 제공하기에는 한계가 있는 실정이다. 이 같은 한계점을 보완하기 위해 보다 짧은 시간에 수집된 자료를 통해 산출될 수 있는 혼잡판단지표와 혼잡의 기준(경계)를 찾기 위한 연구들이 진행 중이다. 본 연구의 목적인 실시간 혼잡판단지표를 도출하기 위해 기존 혼잡에 대한 정의를 검토 후 거시적 혼잡지표 및 혼잡의 기준을 고찰하였으며, 미시적 혼잡판단 방법론에 대해 살펴보았다.

1) 혼잡의 정의

Scharank 외 2명(1997)은 교통혼잡관리 시스템 규정에서 혼잡은 교통 시스템의 운영상태가 차량간섭으로 인해 추가로 수용될 수 없는 수준이며, 수용 가능한 수준은 교통시설의 형태, 교통수단, 지리적 위치, 시간대에 따라 달라진다고 설명하고 있다. 일반적으로 운전자들은 자유통행 속도의 60~70% 정도 감소되었을 때 혼잡을 느낀다고 언급하였다.

Lomax(1997)에 의하면 혼잡은 자유류(Free flow) 통행상태에서의 통행시간을 기준으로 통행시간의 증가 또는 지체시간의 증가를 혼잡으로 정의 하였다.

국토연구원(1997)에 의하면 일반적으로 도로의 “교통 혼잡이란 용량을 초과하는 과도한 교통수요나 도로 구조상의 문제, 그리고 교통사고 등의 다양한 원인에 의해서 발생하는 차량의 지·정체 및 대기행렬 현

상”으로 정의하고 있다. 교통혼잡은 도로의 유형에 따라 다른데, 고속도로는 60km/h 이하일 때 혼잡으로 간주하고, 국도 40km/h, 지방도 30km/h를 혼잡의 기준으로 사용 가능함을 언급하고 있다.

Chen 외 1명(2001)은 혼잡을 운전자 측면과 교통전문가 측면으로 구분하여 정의하였다. 운전자 측면에서의 혼잡은 자유류 통행상태에서 통행시간의 증가 또는 지체시간이 증가된 상태로 정의하였다. 교통전문가 측면에서는 최대통과교통량 상태보다 통행시간 또는 지체시간이 증가한 상태로 정의하였다.

일반적으로 도로 설계시 준용하고 있는 도로용량편람(2013)에서는 교통운영 상태를 여러 단계(A~F)의 서비스 수준(Level of Service)으로 구분하고, LOS E와 LOS F 상태를 혼잡으로 규정하고 있다. 서비스 수준은 도로의 기하구조(연장, 구배, 경사, 차로수 등), 교통류특성(중차량 구성비) 등 다양한 요소를 고려하고 있다.

<표 1> 혼잡의 정의

구분		내용
Scharank 외 2명 (1997)	문헌명	URBAN ROADWAY CONGESTION-1982 TO 1994
	정의	· 차량간섭으로 인해 추가 수용될 수 없는 수준
Lomax (1997)	문헌명	Quantifying Congestion: user's guide
	정의	· 자유류 상태의 통행시간 대비 통행시간 및 지체의 증가
국토연구원 (1997)	문헌명	도로교통혼잡지표 개발에 관한 연구
	정의	· 다양한 원인에 의한 정체 및 대기행렬이 발생하는 현상
Chen 외 1명 (2001)	문헌명	Causes and Cures of Highway Congestion
	정의	· 운전자측면 자유류 통행상태 통행 및 지체 시간이 증가된 상태 · 교통전문가측면 최대통과교통량 상태 통행 및 지체 시간이 증가된 상태
국토교통부 (2013)	문헌명	도로용량편람
	정의	· 교통운영 상태를 (A-F)의 서비스 수준으로 구분 · 교통 수요가 교통 용량을 넘어서서 통행이 와해된 상태

2) 거시적 혼잡관련 지표

Scharank 외 2명(1993)은 고속도로의 소통상황을 표현하기 위해 도로혼잡지표(RCI; Roadway Congestion Index)를 개발하였다. 도로혼잡지표는 교통혼잡의 기간과 강도를 반영하는 척도로써 고속도로 일평균 통행거리(VMT; Vehicle Mile Travelled), 주간선도로상 일평균 통행거리를 변수로 혼잡이 발생하는 속도를 유지하기 위한 한계 교통량 값인 14,000과 5,500의 가변적인 상수 값을 변수로 계산된다. 해당 지표는 거시적인 지역별 도로의 혼잡상황을 비교하기 위해 개발되었다. 도로혼잡지표는 한계 교통량을 혼잡측정 기준으로 설정하였다. 일반적으로 혼잡이 심할수록 교통량이 감소하기 때문에 혼잡이 지속될수록 정밀도가 낮아진다는 한계가 있다. 특히 일평균 통행거리와 같은 실시간으로 구득이 불가능한 지표를 변수로 사용하여 실시간으로 혼잡을 판단하기에는 한계가 있다.

Scharank 외 2명(1997)은 고속도로의 소통상황을 통행율지표(TRI; Travel Rate Index)로 설명하였다. 통행율지표는 첨두시 통행율을 비첨두시 통행율로 나눈 값으로 혼잡 발생시 필요한 추가적인 통행시간을 나타내는 지표로 통행율지표 값이 1.2인 경우 첨두시 통행시간이 비첨두시 통행시간에 비해 20% 증가함을 의미한다. 인구규모가 큰 도시일수록 첨두, 비첨두의 통행율이 뚜렷이 구분되어 TRI 값은 크게 나타난다고 언급하였다. 통행율지표는 1일 또는 일정 기간의 자료를 기반으로 산출되며, 첨두시와 비첨두시의 기준설정이 필요한 지표다. 따라서 실시간으로 고속도로 소통상황을 판단하기에는 한계가 있다.

Lindley(1986)는 고속도로의 혼잡도를 파악할 수 있는 혼잡심각도지표(CSI; Congestion Severity Index)를 개발하였다. 혼잡심각도지표는 서비스수준D(V/C: 0.77)를 기준으로 그 이상인 상태에서 발생하는 총 고속도로 지체시간을 통행량으로 나누어 산출되는 지표다. 해당 연구의 지표의 주요 변수는 통행량으로서 Scharank 외 2명(1993)의 도로혼잡지표

(RCI)의 한계점과 같이 혼잡이 심할수록 정밀도는 낮아진다.

Cottrel(1991)은 정체시 한 구간의 특정 구역이 혼잡하다면 해당 구간은 모두 혼잡하다는 가정 하에 도로차선연장 체류시간지표(LMDI; Lane-Mile Duration Index)를 개발하였다. 도로차선연장 체류시간지표는 고속도로 각 구간별 혼잡한 구간의 연장에 혼잡의 지속시간을 곱해 고속도로 일정구간의 혼잡규모를 표현하는 지표다. 해당 지표는 총 고속도로 연장에 무관하게 혼잡이 발생하는 구간의 연장만을 고려해 다른 노선과의 절대적인 비교가 불가능 하다.

Thurgood 외 1명(1994)은 서로 다른 고속도로 노선별로 Cottrel(1991)의 도로차선연장 체류시간지표의 상호비교가 가능하도록 해당 고속도로의 총 도로연장으로 나누어 고속도로 혼잡지표(FCI; Freeway Congestion Index)를 제안하였다. 이는 정규화된 지표로 다른 노선과의 절대적인 비교가 불가능한 도로차선연장 체류시간지표의 한계점을 보완하였다. 도로차선연장 체류시간지표와 고속도로 혼잡지표는 이미 해당 구간의 혼잡을 확인한 상태에서 산출되는 지표로서 실시간으로 혼잡을 판단하기에는 한계가 있다.

Scharank 외 1명(2003)의 Urban Mobility Report 에는 통행시간지표(TTI; Travel Time Index)를 지표로 미국내 85개 도시로부터 수집된 자유류 통행시간과 첨두시 통행시간을 변수로 산출된다. 통행시간지표는 자유속도 상태의 통행시간 대비 첨두시간 통행시간의 비율로 정의하고 있다. 해당 지표는 원하는 분석시간대의 값을 산출 할 수 있고, 타 구간 또는 지역 간 비교가 가능하다. 특히 교통소통상태의 변화추이를 파악할 수 있어 고속도로 정체의 진행유무를 파악 할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 구간별로 다른 도로연장으로 인해 실시간 고속도로 혼잡 판단시 자유 및 첨두시의 통행시간을 미리 설정해야 한다는 단점이 있다. 따라서 상대적으로 불안정한 첨두시 패턴을 보이는 구간에서는 신뢰성을 확보하기 어렵다.

<표 2> 거시적 혼잡관련 지표(지표)

구분		내용
Scharank 외 2명 (1993)	문헌명	Estimates of urban roadway congestion
	지표	$RCI = \frac{\frac{Freeway VMT}{Lane - Mile} \times Freeway VMT + \frac{prin. Art VMT}{Lane - Mile} \times prin. Art VMT}{14,000 \times Freeway VMT + 5,500 \times prin. Art VMT}$ <p><i>Freeway VMT</i> : 고속도로 일평균 통행거리 (Veh-Mile/day) <i>prin. Art VMT</i> : 주간선도로 일평균 통행거리 (Veh-Mile/day)</p>
Scharank 외 2명 (1997)	문헌명	URBAN ROADWAY CONGESTION-1982 TO 1994
	지표	$TRI = \frac{Freeway Peak Period Travel Rate}{Freeway Freeflow Travel Rate}$ $Travel Rate = \frac{travel time(min)}{segment length(miles)} = \frac{60}{average speed(mph)}$
Lindley (1986)	문헌명	Quantification of urban freeway congestion and analysis of remedial measures
	지표	$CSI = \frac{Total Freeway delay}{Freeway Million VMT}$ <p><i>Total Freeway delay</i> : 총 고속도로 지체시간 (Veh-Hr) <i>Freeway Million VMT</i> : 고속도로 일평균 통행거리 (Veh-Mile/day)</p>
Cottrell (1991)	문헌명	Measurement of the extent and duration of freeway congestion in urbanized areas
	지표	$LMDI_F = \sum_{i=0}^m [congestion Lane - Miles_i \times congestion Duration_i]$ <p><i>i</i> : 고속도로 각 구간 <i>m</i> : 고속도로 총 구간</p>
Thurgood 외 1명 (1994)	문헌명	Measurement of the extent and duration of freeway congestion in urbanized areas
	지표	$FCI = \frac{LMDI}{총도로연장}$
Scharank 외 1명 (2003)	문헌명	The 2003 Annual Urban Mobility Rep
	지표	$TTI = \frac{peak period travel time}{free flow travel time} = \frac{free flow travel speed}{peak period travel speed}$

<표 3> 거시적 혼잡관련 지표(시사점)

구분		내용
Scharank 외 2명 (1993)	문헌명	Estimates of urban roadway congestion
	시사점	· 교통혼잡의 기간과 강도를 반영하는 척도 · 혼잡시 검지교통량 감소되어 혼잡할수록 정밀도는 감소 · 거시적인 지역별 도로의 혼잡상황을 비교하기 위해 개발
Scharank 외 2명 (1997)	문헌명	URBAN ROADWAY CONGESTION-1982 TO 1994
	시사점	· 비첨두 대비 첨두시 추가 통행시간을 지표로 사용 · 1일/일정 기간의 자료를 사용한 거시적 혼잡지표
Lindley (1986)	문헌명	Quantification of urban freeway congestion and analysis of remedial measures
	시사점	· V/C 가 0.77 이상인 상태의 차량당 지체시간을 지표로 사용 · 혼잡시 검지교통량 감소되어 혼잡할수록 정밀도는 감소
Cottrell (1991)	문헌명	Measurement of the extent and duration of freeway congestion in urbanized areas
	시사점	· 혼잡한 차량의 연장과 혼잡 지속시간의 곱을 지표로 사용 · 일정 구간의 혼잡규모를 표현함 · 혼잡정도 고속도로 별 비교를 위한 거시적 혼잡지표
Thurgood 외 1명 (1994)	문헌명	Measurement of the extent and duration of freeway congestion in urbanized areas
	시사점	· 서로 다른 고속도로 노선별 비교를 위해 LMDI를 총 고속도로 연장으로 나누어 정규화
Scharank 외 1명 (2003)	문헌명	The 2003 Annual Urban Mobility Rep
	시사점	· 자유류 통행시간과 첨두시 통행시간의 비율을 지표로 사용 · 타구간/지역간 혼잡 정도 비교를 위한 거시적 혼잡지표

3) 미시적 혼잡 판단 방법론

D'Andrea, E 외 1명(2017)은 운전자의 스마트 폰에서 수집된 GPS 데이터를 50m의 구간(주간선도로)단위 맵매칭을 통해 각 구간의 속도를 산출하였다. 이상치와 운전자의 개인행태(운전중 휴식)를 제거하기 위해 설정한 구간내 최소 4대 이상의 차량이 존재할 때 집계된 속도의 중위값으로 구간의 속도를 산출하였다. 산출된 속도를 통해 heavy, light, very light로 혼잡상태를 제시하였다. 자료 집계 단위시간은 경험적으로 2분이 신뢰성과 응답성 측면에서 가장 적절하다고 언급하였다.

Altintasi, O 외 2명(2017)은 1분 주기로 수집된 GPS 평균 속도를 기반으로 HCM에서 제시하고 있는 LOS분류 기준에 따라 4가지 소통상태를 정의하였다. 1; Free-flow(LOSA, B), 2; Stable-flow(LOSC), 3; Approaching Unstable flow(LOSD, E), 4; Congested flow(LOSF). 소통상태는 공간에 따라 달라지므로, 동시간대 두 개의 연속된 구간(2CSS) 및 세 개의 연속된 구간(3CSS)의 소통상태의 변화로 혼잡의 전환패턴을 정의하였다. 연속된 구간 속도의 전환패턴을 통해 반복적인 혼잡, 혼잡해소 등 교통류의 흐름을 탐지하는 방법론을 제시하였다. 각 구간의 평균속도만을 사용하더라도 데이터가 연속적이며 광범위하다면 반복적인 혼잡을 쉽게 식별할 수 있음을 언급하였다.

Anbaroglu, B 외 2명(2014)은 혼잡을 반복적인 혼잡(RC; Recurrent Congestion)과 비 반복적인 혼잡(NRC; Non-Recurrent Congestion)으로 구분하였다. 비 반복적인 혼잡을 검지하기 위해 지점검지체계의 차량번호판인식(ANPR; Automatic Number Plate Recognition) 시스템 자료를 사용하였다. 구간의 집합에 따른 구간통행시간의 시·공간적 클러스터링을 통해 인접구간에 과도한 구간통행시간이 미치는 영향으로 비 반복적 혼잡을 검지하였다. 시·공간적 클러스터링은 과도한 구간통행시간이 공간적으로 전이되는 형태와 시간적으로 전이되는 형태를 포괄하여 혼잡의 규모 파악이 가능함을 언급하였다.

Wang, Q 외 2명(2017)은 CCTV 영상 데이터를 통해 영상에 검지된 차량을 밀도개념으로 혼잡도를 판별하였다. 혼잡도는 영상에 검지된 차로 폭, 연장, 시간(비디오 프레임 수)과 차량의 점유도를 기반으로 혼잡율을 산출하였다. 실제 혼잡율과 영상데이터를 통한 혼잡율의 평균제곱근 오차를 거리요소로 메트릭 러닝(Metric learning) 기법을 사용하여 혼잡을 검지하는 방법론을 제시하였다. 특히 해당 연구에서는 교통류 지표중 밀도 기반 지표가 혼잡도를 제일 잘 나타낸다고 언급하였다.

Wei, L 외 1명(2016)은 GLSCM(Grey Level Co-occurrence Matrix) 이미지 텍스처 분석을 통해 화면내 차량밀도를 추정하는 방법론을 개발하였다. 이미지상 도로는 회색으로 화면내 차량의 밀도가 크게 나타날수록 반비례하여 GLSCM의 엔트로피는 감소하게 된다. 도로의 여러 이미지를 기반으로 GLSCM의 임계값을 도출 하여 혼잡을 판단하는 방법론을 제시하였다.

복기찬 외 4명(2009)은 지점검지체계인 VDS 자료를 통해 혼잡 판단의 기준을 제시하기 위해 종합소통지수(TCI; Traffic Condition Index)를 개발하였다. 종합소통지수는 설계밀도, 통행밀도, 설계속도, 통행속도의 변수로 구성된 함수로 운전자의 이동성과 자유성 및 정시성을 동시에 고려하였다. 종합소통지수는 100점 척도로 혼잡(0~50), 소통양호(50~70), 소통원활(70~100)로 구분된다. 해당 연구에서 Scharank 외 1명 (2003)의 통행시간지표는 자유류 상태를 기준으로 현재 소통상태의 상대적인 규모를 보여줄 뿐 소통상태 구분 기준이 없음을 언급하였다.

서형일 외 3명(2011)은 지점검지체계인 레이더검지기 자료를 바탕으로 도시부 실시간 소통상황 정보제공을 위한 정성적 지표를 개발하였다. 해당 연구에서는 소통상황의 기준을 판단하기 위해 지점의 시간대별 속도변화추이에 따라 30km/hr, 50km/hr를 기준으로 원활(G), 서행(Y), 정체(R)로 구분하였다. 추가적으로 속도의 추세를 반영하기 위해 증가(U), 진동(V), 감소(D)를 고려하였다. 소통상황의 판단 지표는 2분단위로 집

계된 속도 데이터의 연속적(5 시간대=10분)인 감소(D) 및 증가(U), 진동(V)과 그때의 원활(G), 서행(Y), 정체(R)의 기준에 따라 9가지 소통상황 유형을 정립하였다. 해당 연구에서 AVI, UTIS, DSRC 방식의 구간검지 체계를 기반으로 한 소통상황 알고리즘 개발이 필요함을 언급하였다.

<표 4> 미시적 혼잡판단 방법론

구분		내용
D'Andrea 외 1명 (2017)	문헌명	Detection of traffic congestion and incidents from GPS trace analysis
	시사점	· GPS 데이터를 이용해 대상 구간의 소통상황을 4대 이상의 차량의 중위속도를 이용하여 표현
Altintasi 외 2명 (2017)	문헌명	Detection of urban traffic patterns from Floating Car Data
	시사점	· GPS 데이터를 이용해 대상 구간의 소통상태를 속도지표를 이용하여 4가지 상태로 정의 · 빅데이터 기반 속도지표로 혼잡 식별 가능
Anbaroglu 외 2명 (2014)	문헌명	Spatio-temporal clustering for non-recurrent traffic congestion detection on urban road networks
	시사점	· 지점검지체계 데이터를 이용 · 시·공간적 클러스터링을 통해 비 반복적 혼잡을 검지
Wang 외 2명 (2017)	문헌명	Locality constraint distance metric learning for traffic congestion detection. Pattern Recognition
	시사점	· CCTV 영상 데이터를 통해 기계학습 영상에 검지된 차량을 밀도개념으로 환산해 혼잡도를 판별 $congestion = \frac{\sum_{x,y,t} f(x,y,t)}{width \times length \times time} \quad f(x,y,t) = \begin{cases} 1, & occupied \\ 0, & occupied \end{cases}$
Wei 외 1명 (2016)	문헌명	Real-time road congestion detection based on image texture analysis
	시사점	· 이미지 텍스처 분석을 통해 차량밀도를 추정하는 방법론
북기찬 외 4명 (2009)	문헌명	고속도로 소통상태지수 개발에 관한 연구
	시사점	· 지점검지 VDS 자료 기반 혼잡 기준을 제시 · 밀도, 속도 지표 사용 $TCI = f\left(\frac{\text{설계밀도}}{\text{통행밀도}} \times \frac{\text{통행속도}}{\text{설계속도}}\right)$
서형일 외 3명 (2011)	문헌명	도시부도로 혼잡판단지표 개발에 관한 연구
	시사점	· 지점검지 레이더 자료 기반 속도의 추세를 이용 · 구간검지체계자료 기반 소통상황 판단 방법론 필요성 언급

2. 본 연구의 차별성

과거 통신기술이 취약한 시대 개발된 지표는 특정 시간대 혹은 전일에 걸쳐 수집된 자료를 통해 산출하도록 개발되었다. 통신기술의 발달로 인해 실시간 데이터 수집이 가능한 현재 실시간으로 소통상황을 모니터링할 수 있는 지표를 개발하기 위한 연구들이 진행 중이다. 대부분의 최근 연구는 지점검지체계(CCTV, VDS, ANPR, 등)의 자료를 사용하여 혼잡 및 소통상황을 표현할 수 있는 지표를 개발하였다. 지점검지체계의 자료는 전수화된 자료로 밀도와 교통량을 사용함에 무리가 없다. 하지만 GPS, DSRC 등 구간검지는 표본의 자료로 구간 및 시간대에 따라 표본율은 다르기 때문에 표본율에 가장 적은 영향을 받는 속도만을 사용하였다.

지점검지시스템의 경우 영상을 이용한 이미지프로세싱 기법으로 혼잡을 판단하는 방법론이 주를 이뤘다. GPS의 경우 주로 맵매칭을 통한 일정 지역 및 구간의 개별차량 통행속도를 집계하여 혼잡을 판단하였다. 지점검지시스템을 활용한 혼잡판단 방법론은 이미지프로세싱 결과를 통해 밀도를 추정함으로써 연속적인 모니터링이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 지점의 소통상태를 표현하기 때문에 일정 구간의 소통상황을 파악하기에 무리가 있으며, 영상검지 특성상 악천후 또는 심야시간대 검지가 되지 않는 단점이 있다. GPS 데이터를 활용한 혼잡판단 방법론은 데이터 수집 및 계산이 용이하며 활용성이 높다는 장점이 있다. 반면 맵매칭으로 인한 오차의 가능성을 내제하며, 타 데이터에 비해 표본율이 적은 문제가 존재한다.

과거 거시적 혼잡관련 선행연구는 지역간 또는 도로간 혼잡의 심각도를 비교하기 위한 목적으로 지표를 개발하였다. 본 연구의 목적에 맞는 지표는 구간의 소통상황을 연속적으로 표현할 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 상기 언급한 관점에서의 혼잡을 정의 하였으며, 구간검지시스템의 수집 자료기반 실시간 혼잡판단이 가능한 지표를 개발하였다.

Ⅲ. 연구방법론

1. 연구방법론의 개요

과거 혼잡의 정의와 관련된 선행연구의 혼잡은 자유류 통행상태의 교통류 특성값(통행시간, 차량의 지·정체) 또는 한계 용량을 경계로 이를 넘어선 경우를 혼잡으로 정의 하였다. 이 경계는 도로의 기하구조, 도로 이용 수단의 구성비, 지리적 위치, 요일, 날씨, 등 다양한 요인에 따라 달라진다. 특히 구간검지 자료는 전수 자료가 아닌 표본의 자료로서 경계값은 표본율에 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 표본율의 영향을 적게 받는 속도 지표만을 사용하여 혼잡판단지표를 개발하였다.

일반적으로 사용하는 기준 시간대 속도 집계는 개별차량들의 평균통행속도로서 개별차량의 주행행태를 고려하지 않는다. 저속주행 차량의 구성비가 클수록 구간의 실제 소통상황과 무관하게 평균통행속도는 낮아진다. 이로 인해 기준 시간대 속도 집계는 구간의 실제 소통상황과 평균통행속도간의 이질성이 커지게 되는 문제를 야기한다. 이 같은 한계를 극복하기 위해서는 개별의 주행행태를 고려한 새로운 지표가 필요하다. 구간검지의 자료는 지점검지 자료와 달리 개별차량의 ID를 갖고 있어 개별차량 단위의 행태를 분석할 수 있다. 즉, 현재 구간을 통과한 차량은 현재까지 주행했던 타 구간의 통행이력을 갖고 있다. 통행이력으로 산정된 각 구간의 주행속도로 차량별 희망하는 주행속도(Desired speed)를 산출할 수 있다. 운전자의 행태 및 차량의 제원에 따라 개별차량 희망주행속도는 다르다. 따라서 같은 속도임에도 차량의 희망주행속도에 따라 나타나는 혼잡의 정도는 다르게 나타난다. 혼잡판단 지표 산출시 개별차량 희망주행속도의 적용은 보다 현실적인 구간의 소통상황을 표현할 수 있다.

본 연구에서 혼잡은 ‘개별차량의 희망주행속도 기준 대비 현재 주행

중인 구간의 속도 감소율이 일정수준 이상인 상태'로 정의하였다. 연구 방법론에서는 정의에 따라 실시간으로 혼잡을 표현할 수 있는 개별차량 속도감소율 지표(VSRI; Vehicle Speed Reduction Index 이하 VSRI)를 개발하였다. IV장 지표의 기준 및 경계설정 부문에서 실시간으로 산출이 불가능한 기준 시간대 구간점유차량대수를 활용하여 VSRI의 혼잡 경계 값을 산정하였다. 이후 V장 지표의 활용 부문에서 VSRI를 사용하여 구간의 혼잡 판단 및 예측방법에 대한 과정을 수록하였다.

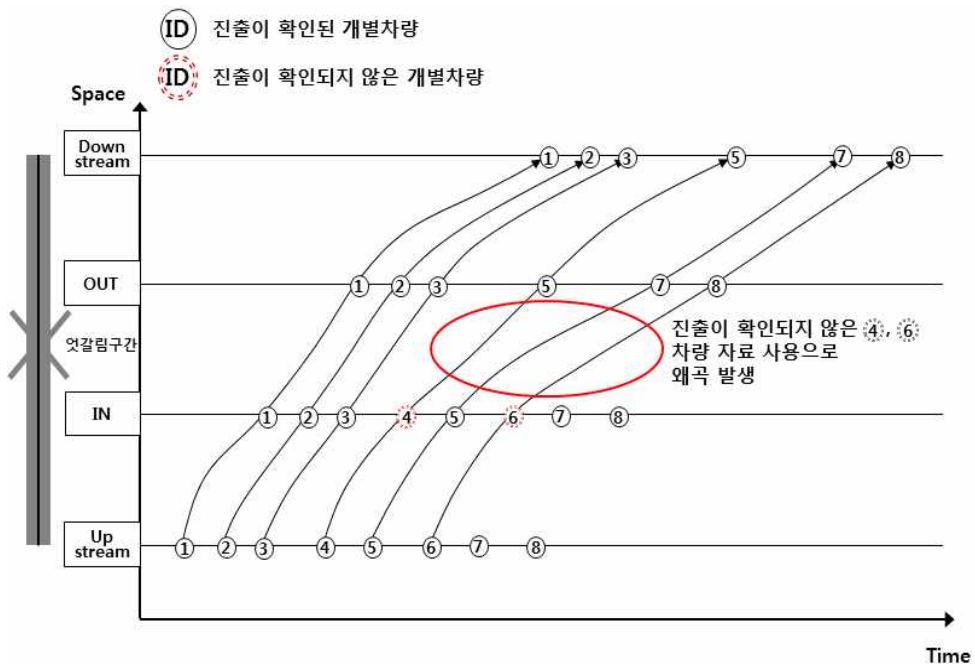
2. 실시간 혼잡판단 지표 설정

회망주행속도는 고속도로 주행 시 회망하는 주행속도로 개별차량의 주행특성 및 제원의 영향으로 각기 다른 값을 갖는다. 일반적으로 중차량은 승용차에 비해 낮은 속도로 고속도로를 주행한다. 이는 차량특성과 운전자의 주행특성이 반영되어 나타난다. 특히 2013년 8월 16일 시행된 규정으로 인해 10인승 이상 또는 총 중량 4.5톤 이상 승합차는 110km/h, 화물 및 트럭 차량은 총 중량 3.5톤 이상 차량에 대해 90km/h 속도제한 장치가 부착 출고되었다.

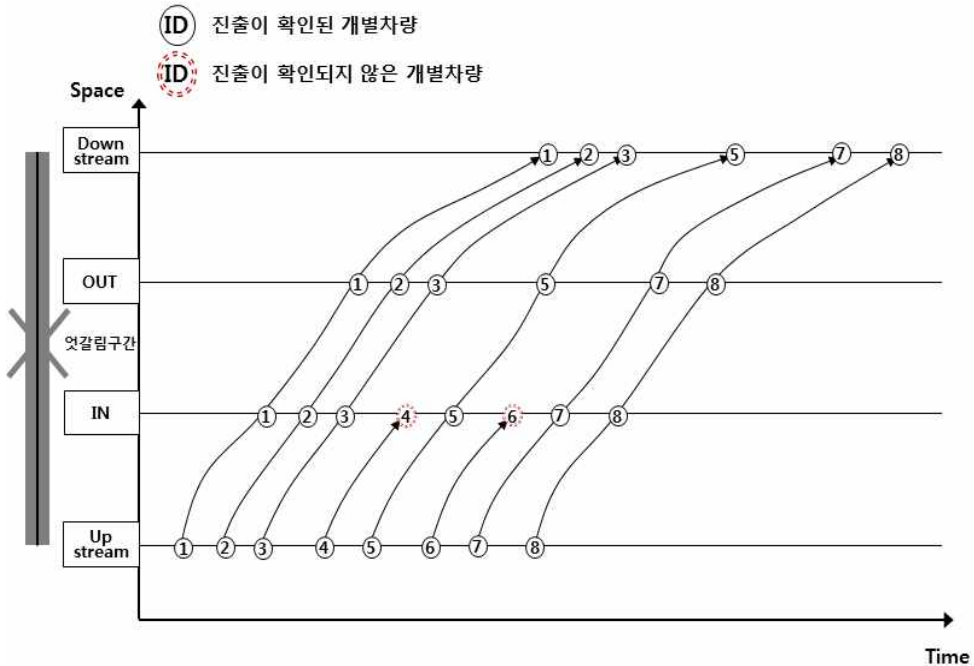
상대적으로 낮은 회망주행속도를 갖는 차량의 구성비가 클수록 기존 시간대 집계 평균속도는 상대적으로 낮은 값을 갖는다. 따라서 기존 평균속도 지표는 해당구간이 혼잡이 아님에도 불구하고 혼잡으로 오판단할 가능성이 있다. 상대적으로 높은 회망주행속도를 갖는 차량의 구성비가 큰 경우, 기존 시간대 집계 평균속도는 상대적으로 높은 값을 갖는다. 그러므로 기존 평균속도 지표는 해당구간이 혼잡임에도 불구하고 비혼잡으로 오판단할 가능성이 있다. 이와 같은 기존 평균속도 지표의 한계를 극복하기 위해 개별 차량의 회망주행속도를 고려하였다. VSRI는 실시간 혼잡판단 지표로서 다음과 같은 구간검지의 실시간 자료집계 특수성을 내포한다.

첫째, 구간 검지로 수집된 개별차량 진입자료는 해당 차량의 진출기록이 생성될 때 까지 불명확하다는 특성이 있다. 해당 구간이 엇갈림(JC 및 IC 포함) 구간인 경우 구간을 진입한 개별차량은 엇갈림구간에서 다른 노선으로 전환 및 고속도로 외부로 진출할 가능성이 있다. 특히 진출기록 없는 개별차량(<그림 2>의 ④번 차량)의 진입자료를 사용하는 경우 해당 차량보다 늦게 진입한 차량(<그림 2>의 ⑤번 차량)의 진출기록과 연결되어 구간의 통행시간은 서로 다른 차량(④번 차량, ⑤번 차량)의 진입-진출 시각으로 왜곡되어 산정된다. 해당 구간이 기본구간인 경우임에도 불구하고 시스템 문제로 인한 진출 기록의 누락 또는 휴게소 이용으로 인한 통행시간의 왜곡된 산정은 발생할 가능성이 있다. 따라서 구간검지 실시간 자료집계시 진출기록이 생성된 개별 차량의 진입기록만을 사용하였다. 또한 왜곡된 결과를 방지하기 위해 집계된 진입-진출 간 개별차량 ID를 확인하는 과정을 수행하였다.

<그림 2> 진출이 확인되지 않은 개별차량 사용시

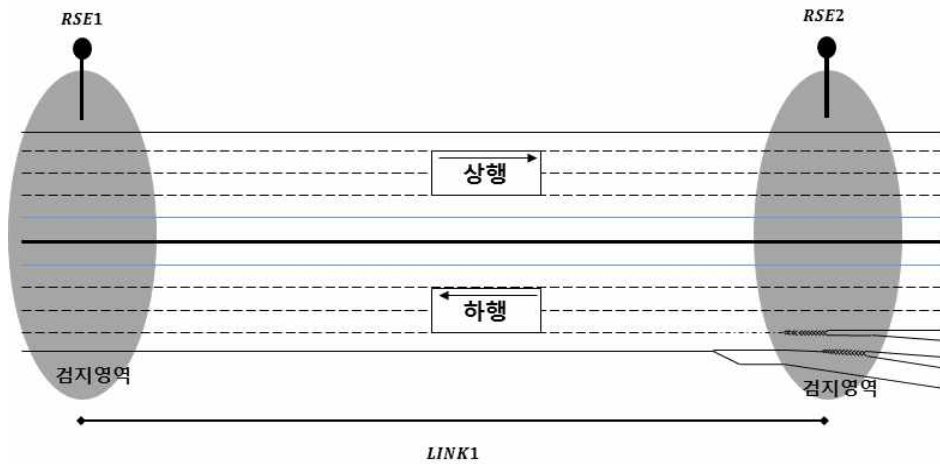


<그림 3> 진출이 확인된 개별차량만 사용시

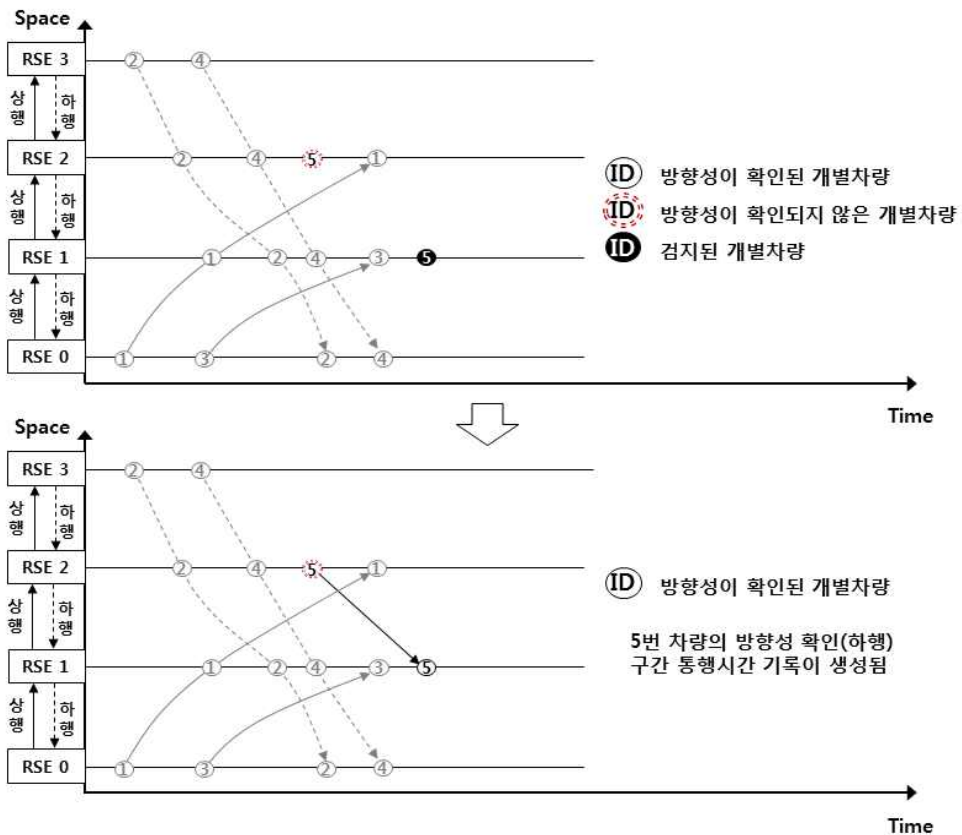


둘째, 구간검지는 상·하행 모두 검지하는 경우가 대부분이라 실시
 간으로 수집 시 개별차량 자료의 방향성을 확인해야 한다. 대부분의 구
 간검지체계는 <그림 4>과 같이 구축되어 있다. RSE 1에 검지된 차량의
 자료는 상행의 진입 또는 하행의 진출 두 가지 가능성이 있다. 방향성
 확인을 위해 검지된 자료는 먼저 진출의 자료여부를 우선 판단한다. 진
 출의 자료여부는 RSE 2의 진입기록에 검지차량의 ID와 동일한 ID를 갖
 는 정보를 검색한다. 만약, 진입기록에 동일 차량정보가 존재하면 <그림
 5>와 같이 해당 자료는 RSE 1을 진출한 차량(하행)이 된다. 진입기록이
 존재하지 않는 경우 해당 자료는 <그림 6>과 같이 RSE 1 진입한 차량
 (상행)으로 간주한다. 해당 정보는 추후 RSE 2에 검지될 차량의 진출여
 부를 판단하는데 사용한다. 개별 차량의 해당구간 진출이 확인(진입, 진
 출 기록이 모두 존재) 되어야 해당 차량의 방향성과 구간 통행시간 정보
 가 생성된다.

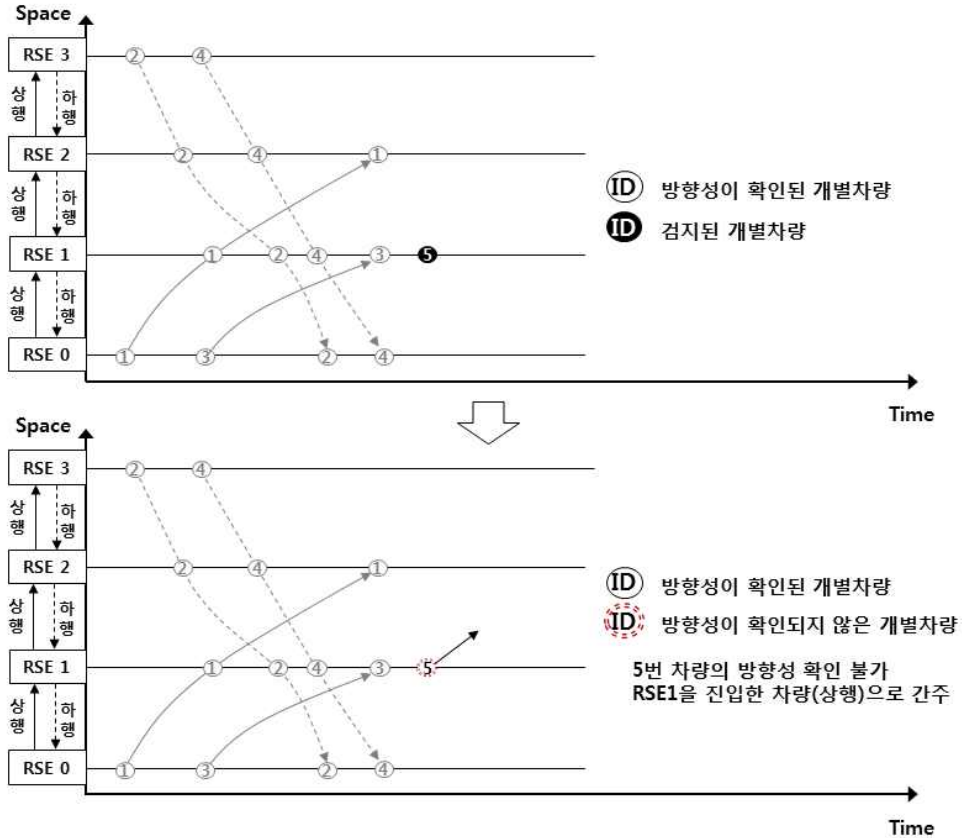
<그림 4> 구간검지체계



<그림 5> 검지차량의 방향성이 확인된 경우

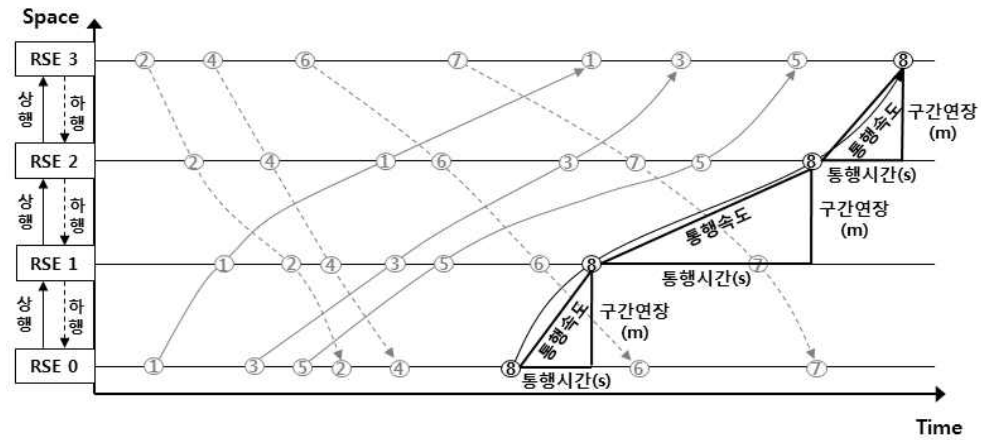


<그림 6> 검지차량의 방향성이 확인되지 않은 경우

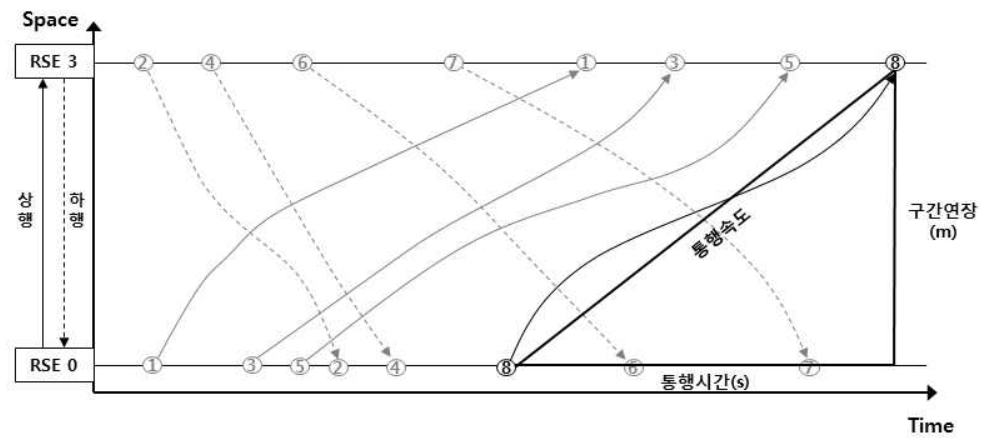


셋째, 구간검지 시스템은 분석 구간의 설정이 비교적 자유롭다. RSE 검지기 위치기반으로 수집되는 자료의 분석시 검지기 위치에 따라 <그림 7>과 같이 최소 단위구간으로 설정할 수 있다. 최소 단위구간으로 설정한 경우 각 구간별 통행속도를 산출할 수 있으며, 구간별 소통상황의 변화를 분석할 수 있다. <그림 8>과 같이 인접하지 않은 구간으로 설정한 경우 구간의 통행속도는 평활화(smoothing) 되어 나타나게 된다. 보다 정교한 분석결과를 위해서는 최소 단위구간의 분석이 필수적이다. 이는 RSE 검지기 설치 구간의 연장이 길수록 구간 내 개별 차량의 통행속도는 평활화 되며, 이로 인해 소통상황의 공간적 변화를 민감하게 검지할 수 없다는 것을 의미한다.

<그림 7> 인접한 구간의 통행속도 산출 개념도



<그림 8> 인접하지 않은 구간의 통행속도 산출 개념도



넷째, 구간검지 자료는 고속도로 내 모든 구간의 자료가 실시간으로 수집된다. 따라서 분석대상 구간을 제외한 구간의 자료는 개별차량의 통행속도 이력자료로 사용한다. 통행속도 이력자료는 각 개별차량의 희망주행속도를 산정하는데 사용된다. 분석대상 구간의 자료를 통해 각 개별차량의 구간통행속도를 산정 후 해당 차량의 희망주행속도를 기반으로 VSRI를 산출한다.

$$V^i(X_j) = \left[\frac{t_{out^j}^i - t_{in^j}^i}{l^j} \times 3.6, \dots X_z \right] \quad \text{if } j \neq \text{object link} \quad (1-1)$$

$$v_d^i = v' \left\{ \begin{array}{ll} v' = \max(V^i(X_j)) & \text{or} \\ v' = \frac{\sum_{j=1}^z V^i(X_j)}{z} & \text{or} \\ V^i(X_j \leq v') \geq \frac{1}{2} \wedge V^i(X_j \geq v') \geq \frac{1}{2} & \dots(1) \end{array} \right. \quad (1-2)$$

$$V_j^{seq}(X_i) = \left[\frac{t_{out^j}^i - t_{in^j}^i}{l^j} \times 3.6, \dots X_n \right] \quad \text{if } j = \text{object link} \quad (1-3)$$

$$VSRI_j^{seq} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{V_j^{seq}(X_i)}{v_d^i} \right)}{n} \quad \text{if } V_j^{seq}(X_i) < v_d^i \quad (1-4)$$

여기서,

$V^i(X_j)$: 차량*i*의 구간 *j*별 주행속도 배열 (대상구간 외)

$t_{out^j}^i$: 차량*i*의 *j*구간 진입시각(초)

$t_{in^j}^i$: 차량*i*의 *j*구간 진출시각(초)

l^j : *j*구간길이 (m)

v_d^i : 차량*i*의 희망주행속도 (km/hr)_최대값, 평균값, 중위값

$V_j^{seq}(X_i)$: 구간*j*의 차량 *i*별 주행속도 배열 (대상구간)

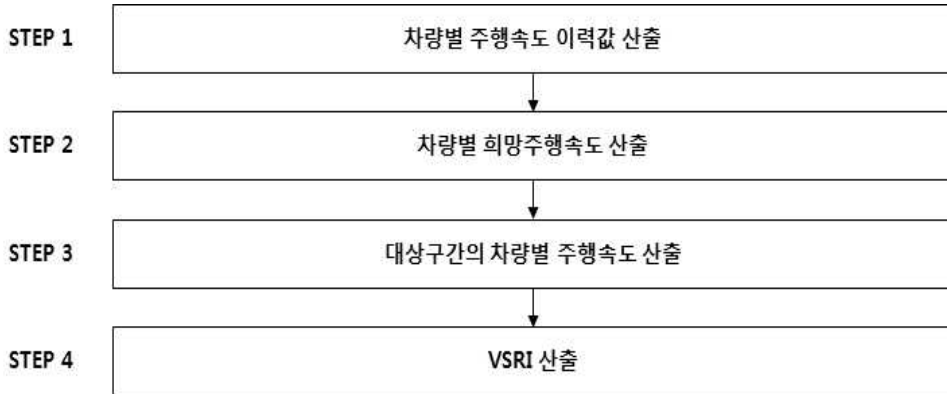
$VSRI_j^{seq}$: 기준시간대 *j*구간 개별차량 속도감소를 지표

n : 기준시간대 대상구간내 검지된 차량수 (대)

SEQ : 기준시간대

본 연구의 실시간 혼잡판단지표인 VSRI를 산출하는 과정은 총 4가지 과정으로 구분된다. STEP 1과 2는 대상구간을 제외한 구간을 대상으로 산출하며, 개별차량 희망주행속도 산출을 위한 과정이다. STEP 3과 4는 대상구간의 자료로 산출하며, VSRI 산출을 위한 과정이다.

<그림 9> 실시간 혼잡판단지표(VSRI) 산출 과정



1) 개별차량 희망주행속도 산출

개별차량 희망주행속도는 대상구간에 진입하기 까지 이용한 대상 외 구간 해당차량의 주행속도 이력값을 기반으로 산출된다. 개별차량 희망주행속도 산출은 차량별 주행속도 이력값을 산출하는 과정과 산출된 이력값을 통해 해당차량의 희망주행속도를 산정하는 과정으로 이루어진다.

STEP 1 차량별 주행속도 이력값 산출

$$V^i(X_j) = \left[\frac{t_{out}^i - t_{in}^i}{l^j} \times 3.6, \dots, X_z \right] \quad \text{if } j \neq \text{objectlink} \quad (1-1)$$

구간검지 데이터의 실시간 구득과 동시에 차량 ID(i)별로 구축된 배열($V^i(X_j)$)에 분석대상구간을 제외한 모든 구간(j)의 주행속도를 순차적으로 기록한다. 주행속도는 각 구간별 연장(l^j)과 해당 차량의 구간 진입

시각(t_{in}^i), 진출시각(t_{out}^i)을 변수로 산출된다.

STEP 2 차량별 희망주행속도 산출

$$v_d^i = v' \left\{ \begin{array}{ll} v' = \max(V^i(X_j)) & \text{or} \\ v' = \frac{\sum_{j=1}^z V^i(X_j)}{z} & \\ \\ v' = \frac{1}{2} \wedge V^i(X_j \leq v') \geq \frac{1}{2} \wedge V^i(X_j \geq v') \geq \frac{1}{2} & \text{or} \end{array} \right. \quad (1-2)$$

희망주행속도의 산출은 차량별 주행속도 이력값 산출이 완료되면 수행한다. 구간검지 데이터의 실시간 구득 횟수에 따라 차량별 주행속도 이력값과 희망주행속도는 추가 및 갱신된다. 개별 차량의 희망주행속도(v_d^i)는 분석 시점까지 집계된 배열($V^i(X_j)$)내 주행속도들의 최대값 기준, 평균값 기준, 중위값 기준으로 산출할 수 있다. 각 기준은 IV장 지표의 기준 및 경계설정 부문에서 자세히 다루었다.

2) VSRI 산출

VSRI의 산출은 분석 대상구간을 이용한 차량을 대상으로 분석 시점의 해당차량 희망주행속도와 대상구간의 주행속도로 산출된다. VSRI는 분석 대상구간의 차량별 주행속도 산출 과정과 산출된 주행속도와 해당 차량의 희망주행속도를 통해 지표를 산출하는 과정으로 이루어진다.

STEP 3 대상구간의 차량별 주행속도 산출

$$V_j^{seq}(X_i) = \left[\frac{t_{out}^i - t_{in}^j}{p_j} \times 3.6, \dots X_n \right] \quad \text{if } j = \text{object link} \quad (1-3)$$

구간검지 데이터의 실시간 구득과 동시에 분석기준 시간대(seq)별로 구축된 배열($V_j^{seq}(X_i)$)에 분석대상구간(j)의 주행속도와 차량ID(i)를 시간순으로 기록한다. 주행속도는 대상구간의 연장(l^j)과 차량ID별 대상구간 진입시각(t_{in}^i), 진출시각(t_{out}^i)을 변수로 산출된다.

STEP 4 VSRI 산출

$$VSRI_j^{seq} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{V_j^{seq}(X_i)}{v_d^i} \right)}{n} \quad \text{if } V_j^{seq}(X_i) < v_d^i \quad (1-4)$$

대상구간의 개별 차량 주행속도 산출과 동시에 해당차량의 희망주행속도를 검색한다. 검색된 희망주행속도가 대상구간의 주행속도 보다 클 경우 속도 감소비율을 산출한다. 감소비율은 분석기준 시간대(seq)를 기준으로 집계하여 평균값을 산정한다. 산정된 평균값은 기준 시간대의 VSRI($VSRI_j^{seq}$)로 설정한다.

VSRI는 각 개별차량 희망주행속도 대비 대상구간 주행속도의 감소율을 일정 시간대기준으로 평균한 값이다. VSRI는 대상구간의 주행속도가 희망주행속도보다 낮은 차량을 대상으로 산출된다. 희망주행속도는 차량이 대상구간에 진입하기 까지 이용한 대상외 구간에서 주행한 속도 이력값을 각 기준(최대값, 평균값, 중위값)에 따라 산정한다. VSRI의 값은 0~1의 값을 가지며, 0에 가까울수록 속도감소율의 평균치는 작아 혼잡하지 않음을 의미한다. 반면 1에 가까울수록 속도감소율의 평균치는 커져 대상구간에 혼잡의 강도가 큼을 의미한다. 이후 IV장 지표의 기준 및 경계설정 부문에서는 VSRI 산출의 변수인 희망주행속도 산정 기준과 VSRI의 경계값을 설정하는 과정을 수록하였다.

IV. 지표의 기준 및 경계 설정

1. 자료

본 연구의 목표인 실시간 혼잡판단을 위해 구간검지 시스템을 운영 중인 한국도로공사의 DSRC 원시자료를 사용하였다. 본 연구에서는 2015년 6월 1일~6월 30일 총 29일(6월 15일 누락)의 자료를 사용하였다. DSRC 시스템은 한국도로공사 관리의 31개 노선 3,790km에 설치되어 있으며, 설치간격은 3~6 km 로 민자 고속도로를 제외한 전역에 설치되어 있다. 각 구간(링크)은 두 개의 검지기(노드)로 구성되며, 각 검지기(노드)는 고유의 ID(RSE_ID)를 가지고 있다. 원시자료는 <그림 10>과 같은 형태로 구성되어 있으며, 본 연구에서 사용한 정보는 다음과 같다. (a) 각 검지기ID, (b) 각 검지기ID에 검지된 차량ID(OBU_ID, 최초 검지시 부터 1일간 유지), (c) 00시00분00초~23시59분59초까지의 검지시각 총 3가지 정보를 사용하였다.

<그림 10> DSRC 원시자료의 구조

	(a)	(b)						(c)
수집일시	RSE_ID	OBU_ID	센터수집일시	차종	OBU종류	RSE수집일시	RSE수집시분초	최종변경시각
20150105000000	2100401100867	66177	20150105000000	1	0	20150105	000000	2015-01-12 17:43:21.703
20150105000000	2100401120876	135267	20150105000000	1	0	20150105	000000	2015-01-12 17:43:21.703
20150105000000	2100701310332	191906	20150105000001	1	0	20150105	000001	2015-01-12 17:43:21.703
20150105000000	2100501012004	434689	20150105000001	1	0	20150105	000001	2015-01-12 17:43:21.703
20150105000000	2100501011150	566309	20150105000004	1	0	20150105	000004	2015-01-12 17:43:21.703
20150105000000	2100701180039	580926	20150105000004	1	0	20150105	000004	2015-01-12 17:43:21.703
20150105000000	2100401022511	656952	20150105000004	1	0	20150105	000004	2015-01-12 17:43:21.703
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20150105000000	2100701250454	790745	20150105235952	1	0	20150105	235952	2015-01-12 17:43:21.703
20150105000000	2100501011150	566309	20150105235952	1	0	20150105	235952	2015-01-12 17:43:21.703
20150105000000	2100701180039	580926	20150105235953	1	0	20150105	235953	2015-01-12 17:43:21.703
20150105000000	2100401022511	656952	20150105235954	1	0	20150105	235954	2015-01-12 17:43:21.703
20150105000000	2100401013179	757897	20150105235957	1	0	20150105	235957	2015-01-12 17:43:21.703
20150105000000	2100701250454	790745	20150105235958	1	0	20150105	235958	2015-01-12 17:43:21.703
20150105000000	2100401062582	876346	20150105235958	1	1	20150105	235958	2015-01-12 17:43:21.703
20150105000000	2100501010133	8963	20150105235959	1	0	20150105	235959	2015-01-12 17:43:21.703
20150105000000	2100701281121	10139	20150105235959	1	0	20150105	235959	2015-01-12 17:43:21.703
20150105000000	2100501190663	32742	20150105235959	1	0	20150105	235959	2015-01-12 17:43:21.703

2. 개별차량 희망주행속도 산정기준 비교

본 연구에서는 1분 기준시간대로 분석을 수행하였다. 설정한 기준시간대 개별 차량의 희망주행속도를 최대값, 평균값, 중위값 기준으로 설정하여 분석을 수행하였다. 각 기준에 따라 개별차량 희망주행속도 산정시 이상치가 미치는 영향을 분석하였으며, 분석 결과에 따라 이상치의 영향이 최소화 되는 희망주행속도 산정 기준식을 결정하였다.

1) 개별차량의 희망주행속도 산출(최대값 기준)

$$V^i(X_j) = \left[\frac{t_{out}^i - t_{in}^i}{p_j} \times 3.6, \dots X_z \right] \quad \text{if } j \neq \text{object link} \quad \dots(2)$$

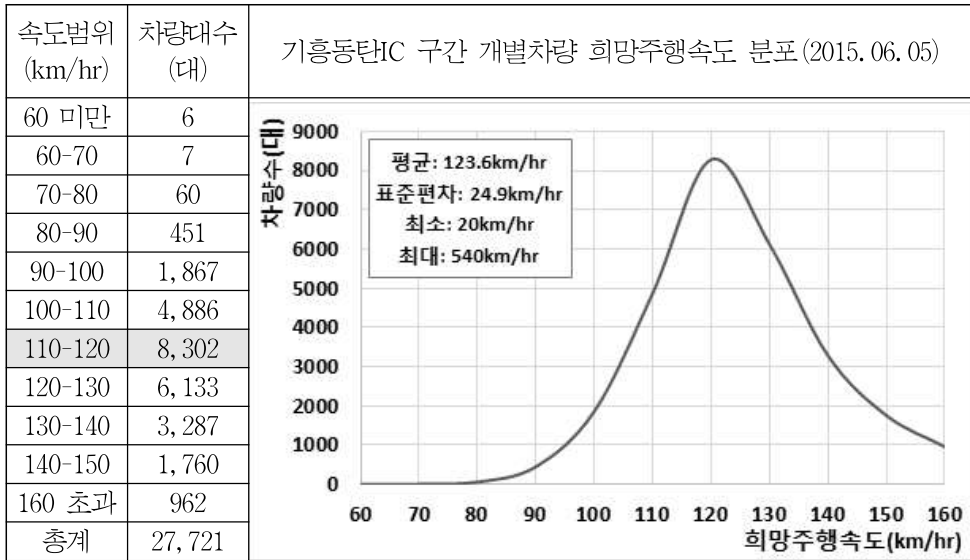
$$v_d^i = \max(V^i(X_j))$$

최대값 기준의 희망주행속도는 식(2)와 같이 각 차량별로 대상구간에 진입하기 까지 이용한 대상 외 구간 주행속도 이력값 중 최대값으로 산정된다. 기흥동탄IC 서울행 구간 2015년 06월 05일(금요일) 최대값 기준의 개별차량 희망주행속도의 산출결과는 <표 5>와 같다. 희망주행속도 범위별 차량 대수는 110km/hr~120km/hr 범위에서 8,302대로 가장 많이 분포되어 있는 것으로 나타났다. 최대값 기준 희망주행속도는 평균 123.6km/hr 표준편차 24.9km/hr 최소 20km/hr 최대 540km/hr로 분석되었다. 최대값 기준의 개별차량 희망주행속도는 오검지 및 검지시스템의 문제로 인한 이상치가 포함될 가능성이 높다. 특히 대상구간이 과속단속 구간일 경우 제한속도 이상의 희망주행속도를 가진 차량은 제한속도 이하로 감속한다. 이로 인해 VSRI는 1에 가까운 값으로 나타나며, 해당구간의 혼잡을 오검지할 가능성이 크다.

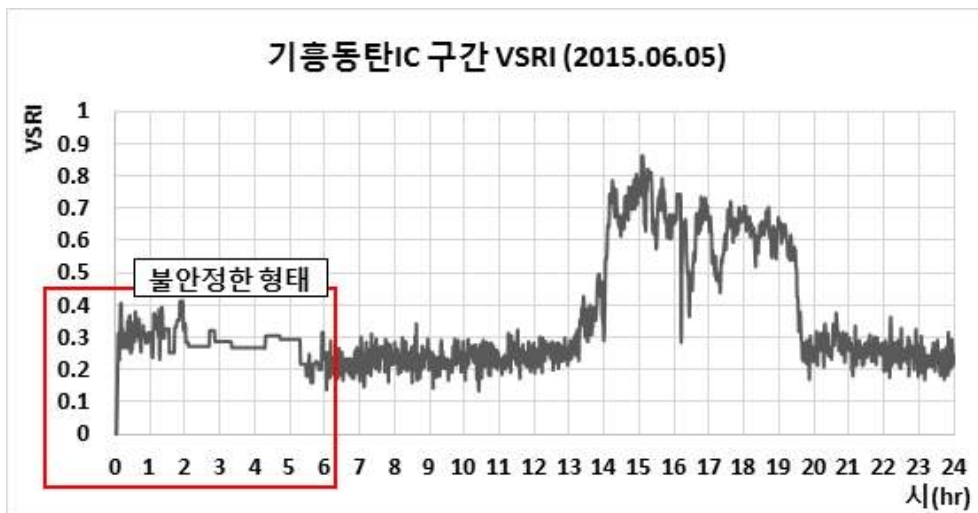
<그림 11> VSRI의 경우 과도한 희망주행속도로 인해 해당 구간은 평균 0.36의 감소율을 보였다. 또한 새벽 시간대(00시~02시) VSRI는 안

정적이지 않은 행태로 나타났다. 이는 해당 구간의 구간과속 단속시스템으로 인해 제한속도 이상으로 기록된 희망주행속도와 해당 구간의 제한된 주행속도로 인해 발생한 문제로 판단된다.

<표 5> 개별차량 희망주행속도 분포도(최대값 기준)



<그림 11> 시간대별 VSRI(최대값 기준)



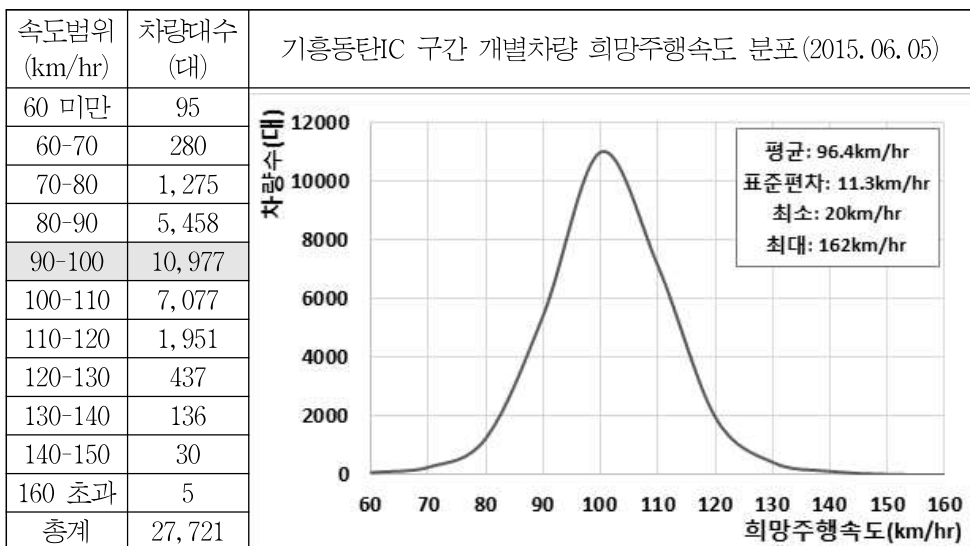
2) 개별차량의 희망주행속도 산출(평균값 기준)

$$v_d^i = \frac{\sum_{j=1}^z V^i(X_j)}{z} \quad \dots(3)$$

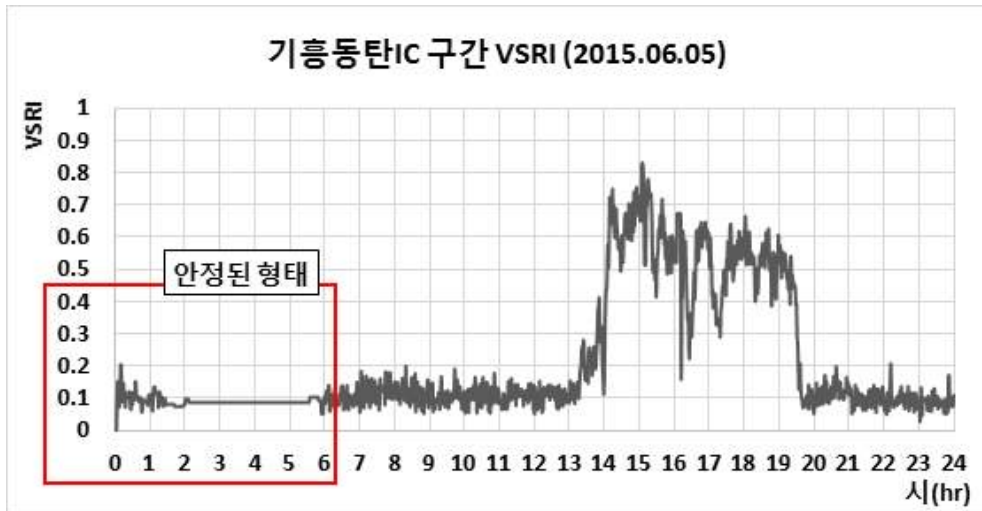
평균값 기준의 희망주행속도는 식(3)과 같이 각 차량별로 대상구간에 진입하기 까지 이용한 대상 외 구간 주행속도 이력값들의 평균값으로 산정된다. 평균값 기준 희망주행속도는 <표 6>과 같이 평균 96.4km/hr 표준편차 11.3km/hr 최소 20km/hr 최대 162km/hr로 분석되었다. 평균값 기준의 개별차량 희망주행속도는 최대값 기준 대비 오검지 및 검지시스템의 문제로 인한 이상치의 영향이 줄어든 것으로 분석되었다.

<그림 12> VSRI의 경우 이상치의 영향이 감소하여 해당 구간은 평균 0.24의 감소율을 보였다. 최대값 기준 개별차량 희망주행속도를 사용한 결과에 비해 침두와 비침두시의 구분이 보다 뚜렷이 나타났다. 새벽 시간대(00시~02시) VSRI는 보다 안정적인 행태를 보였다.

<표 6> 개별차량 희망주행속도 분포도(평균값 기준)



<그림 12> 시간대별 VSRI(평균값 기준)



3) 개별차량의 회망주행속도 산출(중위값 기준)

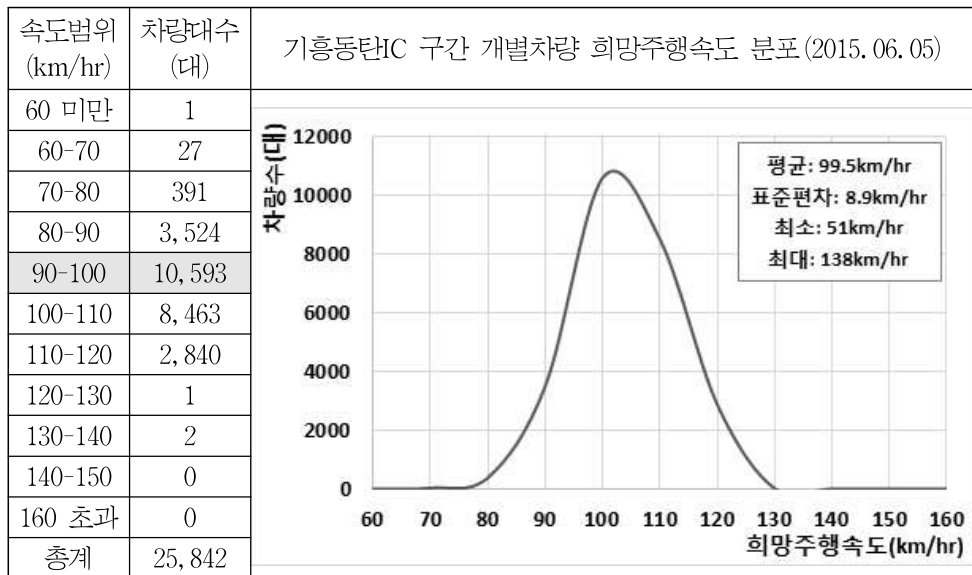
$$V^i(X_j \leq v_d^i) \geq \frac{1}{2} \wedge V^i(X_j \geq v_d^i) \geq \frac{1}{2} \quad \dots(4)$$

중위값 기준의 회망주행속도는 식(3)과 같이 각 차량별로 대상구간에 진입하기 까지 이용한 대상 외 구간 주행속도 이력값 중 중위값으로 산정된다. 중위값 산출을 위해서는 각 차량별 최소 3구간의 이력값 정보가 생성되어야 한다. 따라서 1일 기준 개별차량 회망주행속도 산정 대수는 <표 7>과 같이 최대값 및 평균값 기준 보다 작은 25,842대로 나타났다. 기흥동탄IC 서울행 구간 2015년 06월 05일(금요일) 중위값 기준의 개별차량 회망주행속도를 산출 결과는 다음과 같다. 해당 회망주행속도는 평균 99.5km/hr 표준편차 8.9km/hr 최소 51km/hr 최대 138km/hr로 분석되었다. 중위값 기준의 개별차량 회망주행속도는 평균값 기준과 유사한 것으로 나타났다. 하지만 최소 및 최대 회망주행속도의 격차가 현저히 줄어든 것으로 분석되었다. 이는 이상치가 계산과정에서 포함되는 평균기준 회망주행속도 산출과 달리 이상치가 계산과정에서 포함되지 않기 때문에 나

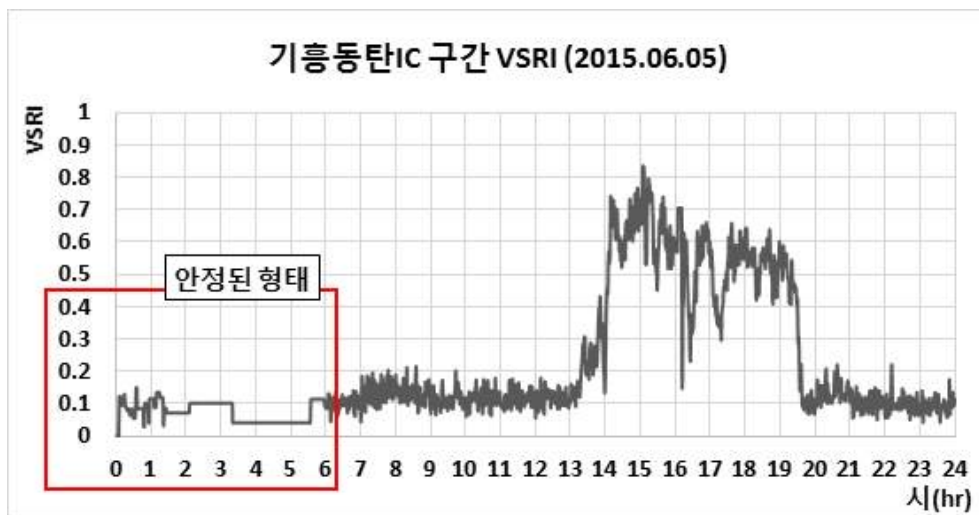
타난 것으로 판단된다.

<그림 13> VSRI의 경우 평균 0.24의 감소율을 보였다. 평균값 기준 개별차량 희망주행속도를 사용한 결과와 유사하게 나타났다.

<표 7> 개별차량 희망주행속도 분포도(중위값 기준)



<그림 13> 시간대별 VSRI(중위값 기준)



4) 개별차량의 회망주행속도 산출결과 비교

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n v_d^i}{n}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_d^i - m)^2}{n}} \quad \dots(5)$$

여기서,

- v_d^i : 차량 i 의 회망주행속도(km/hr)_최대값, 평균값, 중위값
- n : 1일 기준 대상구간내 검지된 차량수(대)
- m : 1일 기준 대상구간내 검지된 차량의 회망주행속도 평균(km/hr)
- σ : 표준편차(km/hr)

최대값, 평균값, 중위값 기준에 따라 회망주행속도의 분포는 다른 양상을 보였다. 보다 정밀한 VSRI를 산출하기 위해서는 개별차량 회망주행속도 산정시 이상치의 영향을 최소화해야 한다. 본 연구에서는 이상치의 영향여부를 판가름 하는 지표로서 표준편차를 식(5)와 같이 사용하였다. 식(5)에 따라 1일 기준 개별차량 회망주행속도의 표준편차가 작을수록 이상치의 영향이 적은 것으로 간주하였다. 적정 회망주행속도 산정 기준을 제시하기 위해 각 기준별 회망주행속도를 2015년 6월 5일~2015년 6월 11일 7일 세 개 구간에 대해 산출하였다. 각 구간은 JC 및 IC를 포함한 엇갈림구간으로 기흥동탄IC, 동탄JC, 오산IC 구간으로 설정하였다.

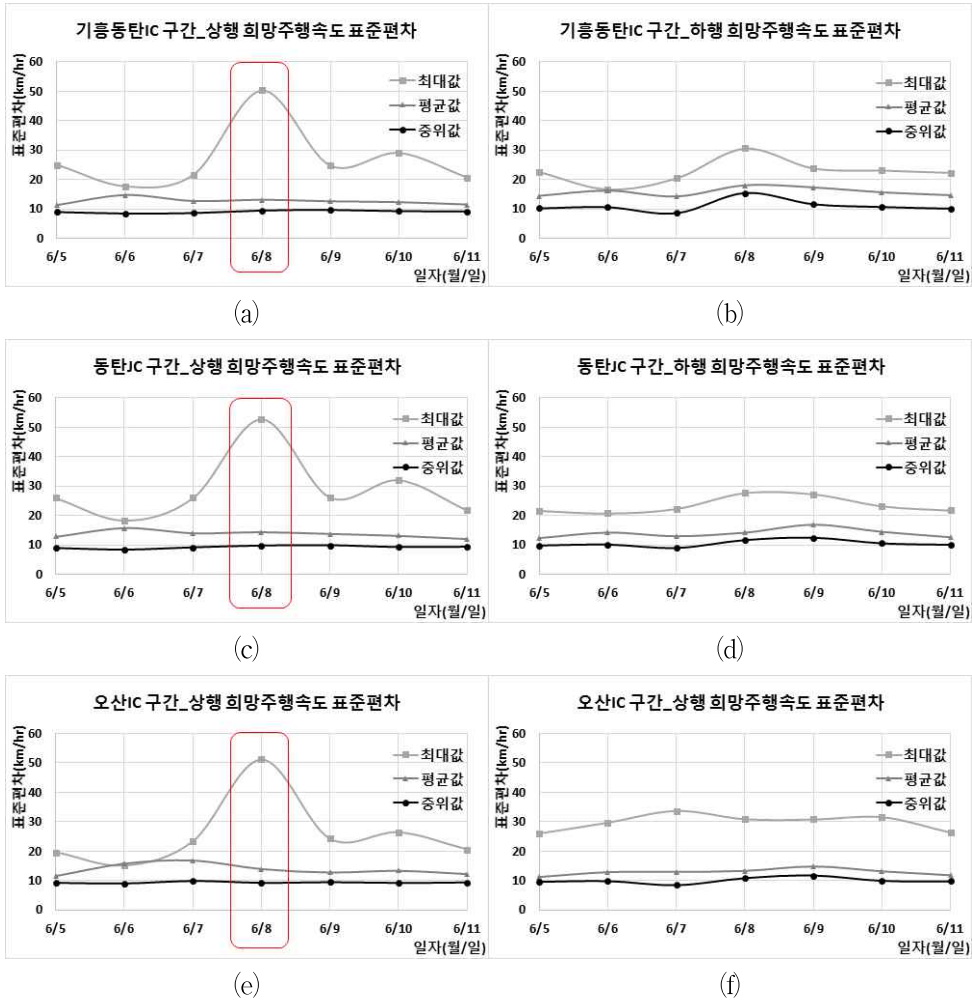
7일 설정한 3구간의 상·하행의 개별차량 회망주행속도 표준편차는 <표 8>과 같이 중위값 기준이 제일 낮게 나타났으며, 최대값 기준이 제일 크게 나타났다. 일자별 표준편차의 변동성 또한 중위값 기준이 제일 낮게 나타났으며, 최대값 기준이 제일 크게 나타났다. 특히 6월 8일(월) 최대값 기준의 표준편차 값이 <그림 14> (a), (c), (e)와 같이 구간별 약 50km/hr로 다른 일자에 비해 크게 나타났다. 이는 해당일 공간적으로 광범위한 혼잡의 영향으로 개별차량의 주행속도 이력값이 해당 혼잡에 영

향을 받아 주행차량의 최대속도 분포가 매우 다양하게 나타났기 때문으로 판단된다. 반면 평균값과 중위값 기준은 다른 일자에 비해 큰 변화가 없는 것으로 분석되었다. 따라서 표준편차의 값과 일자별 표준편차의 변동성이 가장 낮은 중위값 기준의 개별차량 희망주행속도를 VSRI 산출에 사용하였다.

<표 8> 개별차량 희망주행속도 산정 기준별 표준편차

구분		기흥동탄IC 구간 표준편차(km/hr)		동탄JC 구간 표준편차(km/hr)		오산IC 구간 표준편차(km/hr)	
일자	기준	상행	하행	상행	하행	상행	하행
06. 05 (금)	최대값	24.95	22.63	25.96	21.67	19.59	26.14
	평균값	11.31	14.35	12.83	12.21	11.60	11.12
	중위값	8.90	10.23	8.97	9.82	9.24	9.65
06. 06 (토)	최대값	17.59	16.66	18.36	20.74	15.02	29.77
	평균값	14.71	16.18	15.65	14.18	15.86	12.82
	중위값	8.35	10.63	8.49	10.13	8.98	9.88
06. 07 (일)	최대값	21.61	20.41	26.02	22.29	23.38	33.72
	평균값	12.67	14.13	14.00	12.89	16.90	12.90
	중위값	8.53	8.59	9.16	9.01	10.02	8.56
06. 08 (월)	최대값	50.32	30.60	52.75	27.65	51.32	30.95
	평균값	13.11	18.05	14.34	14.16	13.99	13.26
	중위값	9.45	15.40	9.69	11.63	9.25	10.87
06. 09 (화)	최대값	24.69	23.79	26.19	27.25	24.22	30.83
	평균값	12.58	17.30	13.78	16.98	12.80	14.81
	중위값	9.68	11.62	9.81	12.42	9.52	11.72
06. 10 (수)	최대값	29.03	23.10	32.10	23.20	26.44	31.62
	평균값	12.29	15.57	13.13	14.44	13.39	13.12
	중위값	9.23	10.68	9.25	10.54	9.21	9.98
06. 11 (목)	최대값	20.65	22.32	21.84	21.74	20.59	26.42
	평균값	11.48	14.56	12.12	12.53	12.24	11.73
	중위값	9.18	10.13	9.34	10.07	9.41	9.78
평균	최대값	26.98	22.79	29.03	23.51	25.79	29.92
	평균값	12.59	15.73	13.69	13.91	13.83	12.82
	중위값	9.05	11.04	9.24	10.52	9.38	10.06

<그림 14> 일자별 희망주행속도 표준편차



3. VSRI의 혼잡 경계 설정

제시한 VSRI의 혼잡 경계값 산출을 위해 국내 도로용량편람의 고속도로 기본구간 서비스수준 기준을 차용하였다. 서비스수준은 밀도를 주효과적으로 구분된다. 본 연구의 VSRI는 통행시간 기반 지표로 서비스수준을 통한 직접적인 경계설정이 불가능하다. 따라서 구간검지 데이터

로 산출 가능한 구간점유차량대수를 이용하여 간접적으로 경계를 설정하였다. 구간점유차량대수는 해당 구간의 각 시점별로 구간을 점유(잔류)한 차량대수로 정의하였다. 설정한 경계값에 해당하는 시간대 VSRI의 값을 산출하여 VSRI의 혼잡 경계범위를 설정하였으며, 다음과 같은 과정을 수행하였다.

1) 도로용량편람의 서비스수준

도로용량편람에 따르면 서비스수준 A와 D의 최대 밀도 값은 관측 자료를 바탕으로 산정되었다고 언급하였다. 서비스수준 E의 최대 밀도 값은 서비스수준 D에서 교통류가 지속적으로 발생할 경우 예상되는 최대 값으로 명시하였다. 서비스수준 C는 안정된 운행 상태를 제공하지만 통행 자유도가 떨어지며, 추가 교통량에 의해 서비스 질이 많이 떨어지는 범위에 접근한 교통류 상태라고 언급하고 있다.

본 연구에서는 혼잡관리 목표 수준으로 도로용량편람에서 제시하고 있는 서비스수준 C로 설정하였다. 따라서 VSRI의 혼잡관리 목표 경계값 산정을 위해 <표 9>와 같이 서비스수준 C에 해당하는 밀도비(35.71% < x)를 도출하였다.

<표 9> 고속도로 기본구간 서비스수준별 밀도 및 밀도비

서비스수준	밀도 (pc/km/pl)	밀도비율 산정식	밀도비 (%)
A	$x \leq 6$	$\frac{\text{각 } LOS \text{별 기준 밀도}}{LOS F \text{ 기준 밀도}}$	$x \leq 21.43$
B	$6 < x \leq 10$		$21.43 < x \leq 35.71$
C	$10 < x \leq 14$		$35.71 < x \leq 50$
D	$14 < x \leq 19$		$50 < x \leq 67.86$
E	$19 < x \leq 28$		$67.86 < x \leq 100$
F	$28 < x$		$100 < x$

2) 목표 혼잡경계 시점 도출

$$\begin{aligned}
 K_j(X) &= [x_1, x_2, x_3, \dots, x_{86400}] \quad \text{if } j = \text{object link} \\
 K_j(X) &= \sum_{i=1}^y K_j(x_z) + 1 \quad \text{if } t_{in^j}^i \leq z < t_{out^j}^i \\
 &\dots(6) \\
 K_j^n &= \frac{\sum_{z=(n-1) \times seq}^{n \times seq} K_j(x_z)}{seq} \quad 1 \leq n \leq 86400/seq
 \end{aligned}$$

여기서,

$K_j(X)$: j 구간 1일 1초 기준 구간점유차량대수 배열
 $t_{out^j}^i$: 차량 i 의 j 구간 진입시각(초)
 $t_{in^j}^i$: 차량 i 의 j 구간 진출시각(초)
 y : j 구간 1일 총 검지차량대수(대)
 K_j^n : n 기준시간대 j 구간점유차량대수(대)
 n : 기준시간대

구간점유차량대수는 전술한 구간검지의 특성상 해당 구간을 통과한 차량(진입, 진출이 완료된 차량)을 기준으로 집계되어 실시간으로 산출할 경우 정확한 점유차량대수를 산출할 수 없다. 따라서 구간점유차량대수는 전일 기준 집계 후 식(6)과 같이 기준 시간대로 나누어 산출하였다.

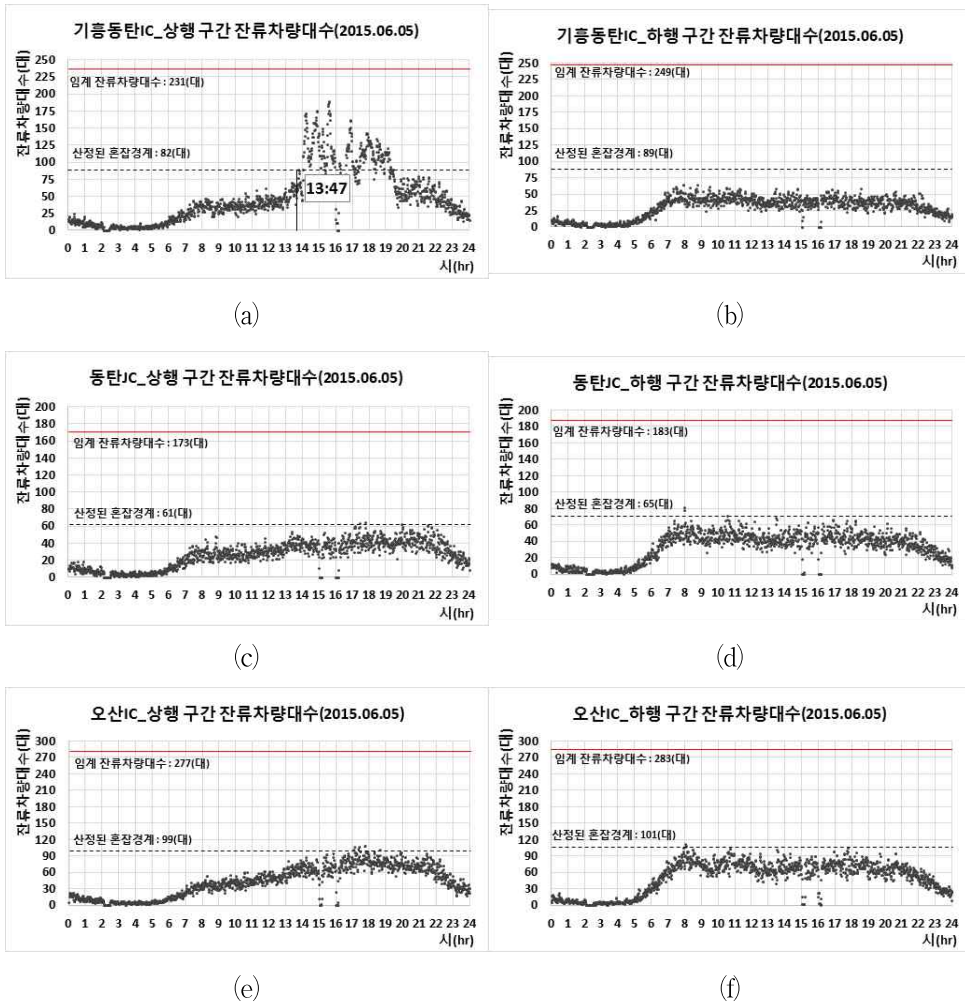
구간점유차량대수는 구간의 특성, 표본율에 따라 임계값이 달라진다. 따라서 2015년 6월의 자료를 대상으로 각 구간별(기흥동탄IC, 동탄JC, 오산IC 구간) 상·하행의 임계값을 도출하였다. 앞서 설정한 서비스수준 C의 밀도비($35.71\% < x$) 기준 비율을 적용해 각 구간별 경계값을 산출하였다. 각 구간별 상·하행의 임계값 및 경계값의 산출결과는 <표 10>과 같다. 산출된 각 구간별 임계값과 경계값을 6월 5일 금요일의 잔류차량대수에 적용하여 혼잡경계시점을 <그림 15>와 같이 도출하였다. 기흥동

탄IC 상행구간인 (a)의 경우 임계 잔류차량대수는 231대, 경계값은 82대로 경계시점은 13시 47분으로 나타났다. 경계시점은 구간별 점유차량대수 경계값을 초과한 시점으로 해당 시점의 VSRI 값을 혼잡경계로 사용하기 위해 산정하였다.

<표 10> 일자별 구간점유차량대수 임계값 및 혼잡경계값

일자	기흥동탄IC 구간 구간점유차량대수 1일 최대값(대)		동탄JC 구간 구간점유차량대수 1일 최대값(대)		오산IC 구간 구간점유차량대수 1일 최대값(대)	
	상행	하행	상행	하행	상행	하행
06/01(월)	186	143	50	144	90	118
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
06/05(금)	189	65	65	81	108	112
06/06(토)	67	64	52	74	78	152
06/07(일)	73	54	59	56	84	71
06/08(월)	82	72	64	145	143	91
06/09(화)	131	157	49	120	176	119
06/10(수)	93	66	53	76	92	112
06/11(목)	79	68	62	75	100	107
06/12(금)	152	62	68	67	103	101
06/13(토)	191	69	101	79	81	153
06/14(일)	64	44	52	50	80	76
06/15(월)	-	-	-	-	-	-
06/16(화)	231	170	49	97	147	102
06/17(수)	138	103	50	71	103	106
06/18(목)	85	164	57	162	91	104
06/19(금)	162	172	65	156	77	101
06/20(토)	74	61	55	104	99	283
06/21(일)	93	56	136	63	93	89
06/22(월)	164	144	58	92	83	155
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
06/30(화)	79	64	55	80	98	101
임계값(대)	231	249	173	183	277	283
경계값(대)	82	89	61	65	99	101

<그림 15> 혼잡경계 시점 도출



3) VSRI의 혼잡경계

구간점유차량 대수를 통해 도출된 목표 혼잡경계 시점의 VSRI 값을 산정하여 혼잡경계를 설정하였다. 2015년 6월 5일~2015년 6월 11일 7일 세 개 구간(기흥동탄IC, 동탄JC, 오산IC 구간) 상·하행을 대상으로 산출한 결과는 <표 11>과 같다. 각 일자 각 구간별 혼잡경계 시점은 주말토, 일(6월 6일, 6월 7일)의 경우 거의 나타나지 않았다. 구간별로는 하행

(부산행)의 경우 오전인 9시~12시 부터 혼잡이 형성되며, 상행(서울행)의 경우 오후인 16시 부터 혼잡이 형성되는 것으로 나타났다. 구간별 점유차량대수의 혼잡 경계값을 통해 도출된 혼잡시점에 VSRI는 유사한 수치를 보이는 것으로 분석되었으며, 7일 3개 구간 평균 0.374로 나타났다. 본 연구에서는 혼잡관리 목표 VSRI를 0.35로 설정하였으며, 이는 개별차량들의 희망주행속도 대비 속도 감소율이 약 35%정도 감소하였을 때를 의미한다.

<표 11> 일자별 혼잡시점에 따른 VSRI 값

구분		기흥동탄IC 구간		동탄JC 구간		오산IC 구간	
		상행	하행	상행	하행	상행	하행
06.05 (금)	혼잡시점 (시:분)	13:47	-	-	07:58	-	08:03
	VSRI	0.346	-	-	0.361	-	0.382
06.06 (토)	혼잡시점 (시:분)	-	-	-	-	-	07:34
	VSRI	-	-	-	-	-	0.354
06.07 (일)	혼잡시점 (시:분)	-	-	-	-	-	-
	VSRI	-	-	-	-	-	-
06.08 (월)	혼잡시점 (시:분)	-	-	-	07:19	15:54	16:48
	VSRI	-	-	-	0.335	0.417	0.398
06.09 (화)	혼잡시점 (시:분)	17:05	12:06	-	12:50	16:31	08:20
	VSRI	0.358	0.377	-	0.414	0.372	0.366
06.10 (수)	혼잡시점 (시:분)	17:16	-	-	-	-	-
	VSRI	0.368	-	-	-	-	-
06.11 (목)	혼잡시점 (시:분)	18:20	-	-	-	-	-
	VSRI	0.388	-	-	-	-	-
혼잡시점 평균 (시:분)		16:37	12:06	-	9:22	16:12	10:11
VSRI 평균		0.365	0.377	-	0.370	0.398	0.375
		0.374					

V. 지표의 활용

실시간 혼잡판단 지표로서 VSRI의 활용성 및 성능을 판단하기 위해 다음과 같은 일련의 과정을 거쳤다. 실시간 자료수집과 동일한 상황을 구현하기 위해 분석과 관련된 가정을 설정하였다. 설정한 가정에 따라 실시간 혼잡판단 알고리즘을 구축하였으며, 구축한 실시간 혼잡판단 알고리즘에서 VSRI를 산출 후 혼잡 판단 및 예측 과정을 수행하였다.

1. 가정

군집시간 균형지표 설정과 구간검지 시스템의 실시간 자료 수집체계와 유사한 모의 실험체계를 구축하기 위해서 다음과 같은 사항을 가정하였다.

1) 데이터 무결성(Data Integrity) 보장에 대한 가정

구간검지 시스템의 집계 자료의 핵심은 개별 차량의 각 구간별 진출입 시각이다. III장 연구방법론에서 전술한 바와 같이 구간검지 시스템의 특성상 진입과 진출 두가지 검지시각이 존재한다. 특히 구간검지의 특수성으로 인한 왜곡된 결과를 방지하기 위해 진입과 진출이 모두 기록된 개별차량(매칭된 차량)만을 사용함을 전제하였다.

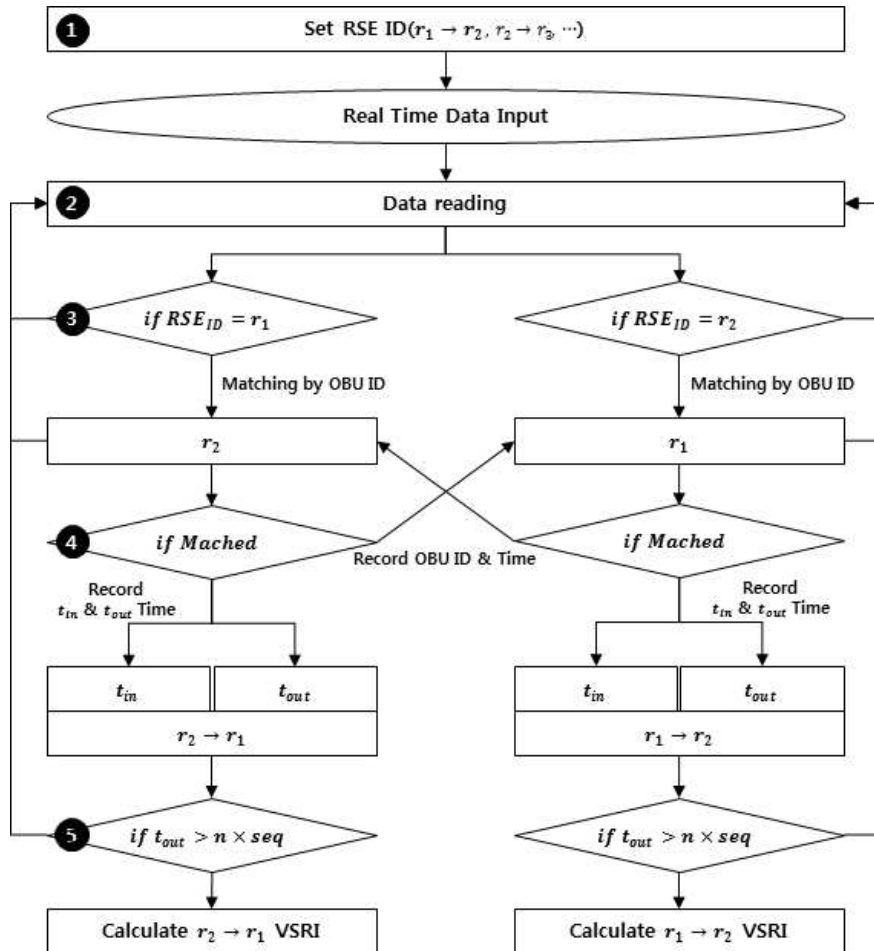
2) 혼잡의 전이 행태에 대한 가정

본 연구의 목적인 실시간 혼잡의 인식 및 예측 중 예측을 위해 혼잡의 전이 행태를 가정하였다. 혼잡은 기본구간을 제외한 엇갈림구간(JC 및 IC)에서 시작하는 것으로 가정하였으며, 이에 따라 분석 경로는 JC 및 IC에서 상류부 JC 및 IC까지로 설정하였다.

2. 실시간 혼잡판단 알고리즘 구축

실시간 혼잡판단 알고리즘은 구간검지 시스템의 실시간 자료 수집체계와 유사하게 설계하였으며, 크게 5단계로 구축하였다. 각 단계는 새로운 진출차량 자료가 수집되는 즉시 수행되며, 자료는 누적으로 보관 및 처리된다. DSRC 시스템의 특성을 고려해 고속도로 양방향(상행, 하행)을 동시에 분석함과 연산시간의 최소화가 가능하도록 설계하였다.

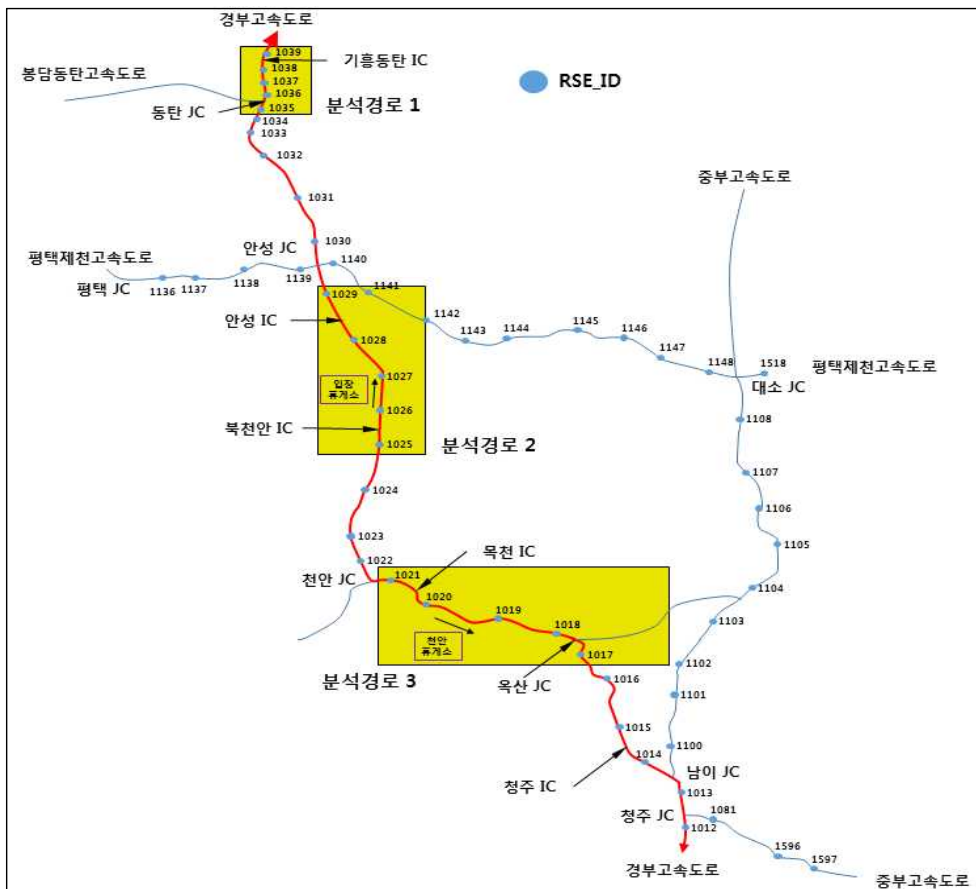
<그림 16> 실시간 혼잡판단 알고리즘



1) 분석경로 설정 단계

개별차량의 희망주행속도 산출을 위한 영향권으로는 양재JC-청주JC 총 36개 구간(시스템 실제 적용시 고속도로 전역)으로 설정하였다. VSRI 산출을 위한 분석 경로는 <그림 17>과 같이 설정하였다. 혼잡의 인식 및 예측을 위해 가정 2) 혼잡의 전이 행태에 대한 가정에 따라 엇갈림구간 - 기본구간-엇갈림구간을 분석경로로 설정하였다. 분석을 위해 영향권 내 모든 구간의 각 인접한 두 개의 RSE ID를 (r_1-r_2 , r_2-r_3 , ...)를 각 쌍으로 지정하였다.

<그림 17> 분석경로 설정



2) 실시간 데이터 수집 및 구독

실제 구간검지 시스템 데이터 수집환경과 유사한 환경을 구축하기 위해 전일 기준의 DSRC 원시데이터(Raw Data)를 사용하였다. 데이터의 저장 및 연산은 행 단위로 기록된 수집시각을 기준으로 <그림 18>과 같이 수행하였으며, 새로운 정보의 구독과 동시에 연산이 수행되도록 설계하였다.

<그림 18> 실시간 데이터 수집

수집일시	RSE_ID	OBU_ID	센터수집일시	차종	OBU종류	RSE수집일자	RSE수집시분초	최종변경시각
20150105000000	2100401100867	66177	20150105000000	1	0	20150105	000000	2015-01-12 17:43:21.703
20150105000000	2100401120876	135267	20150105000000	1	0	20150105	000000	2015-01-12 17:43:21.703
20150105000000	2100701310332	191906	20150105000001	1	0	20150105	000001	2015-01-12 17:43:21.703
20150105000000	2100501012004	434689	20150105000004	1	0	20150105	000001	2015-01-12 17:43:21.703
현재 수집된 자료								
20150105000000	2100701250454	790745	20150105000060	1	0	20150105	000060	2015-01-12 17:43:21.703

3) 대상구간의 자료여부 확인

구독된 자료가 설정한 대상구간의 자료인지 확인을 위해 구독 자료의 RSE_ID 와 설정한 영향권 내 각 RSE ID 쌍과의 일치 여부를 <그림 19>와 같이 확인한다. 설정한 모든 RSE ID 쌍과 일치하지 않는 경우, 과정 2) 실시간 데이터 수집 및 구독 과정으로 돌아가게 되며, 다음 자료를 구독하게 된다. 설정한 모든 RSE ID 쌍 중 하나의 ID(r_1)가 일치하게 되면 영향권의 자료임이 확인 되고 다음과정을 수행한다.

<그림 19> 대상구간의 자료여부 확인

수집일시	RSE_ID	OBU_ID	센터수집일시	차종	OBU종류	RSE수집일자	RSE수집시분초	최종변경시각
20150105000000	2100401013911	790745	20150105000060	1	0	20150105	000060	2015-01-12 17:43:21.703

일치여부 판단

r_1 : 2100401013911

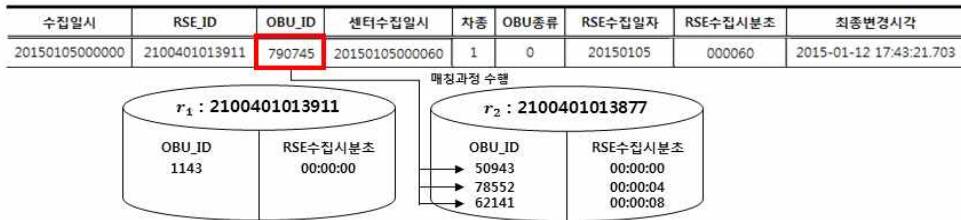
r_2 : 2100401013877

현재 수집된 자료가 영향권의 한 지점 (r_1)에서 검지된 자료로 확인

4) 차량ID 매칭을 통한 방향성 확인

Ⅲ장 에서 언급한 구간 검지의 실시간 특수성을 고려해 현재 검지된 차량의 방향성을 확인한다. 해당 차량이 진출차량인지 여부를 확인하기 위해 진입으로 간주되는 검지지점(r_2)에서 검지된 차량기록과 매칭 작업을 <그림 20>과 같이 수행한다. 해당 과정은 매칭 정보가 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우로 구분된다.

<그림 20> 대상구간의 자료 차량 ID 매칭 과정



① 매칭정보가 존재하지 않는 경우

진입으로 간주되는 검지지점(r_2)과의 매칭 정보가 없으면 해당 차량은 과정 3)에서 확인된 검지지점(r_1)의 진출차량이 아니다. 따라서 해당 정보는 해당 검지지점(r_1)의 진입차량으로 간주한다. 진입차량으로 간주된 자료는 해당지점(r_1)의 검지차량 기록으로 <그림 21>과 같이 저장된다. 저장된 검지차량 기록(r_1)은 대상구간의 다른 검지지점(r_2)에서 검지된 자료의 매칭 대상으로 사용된다.

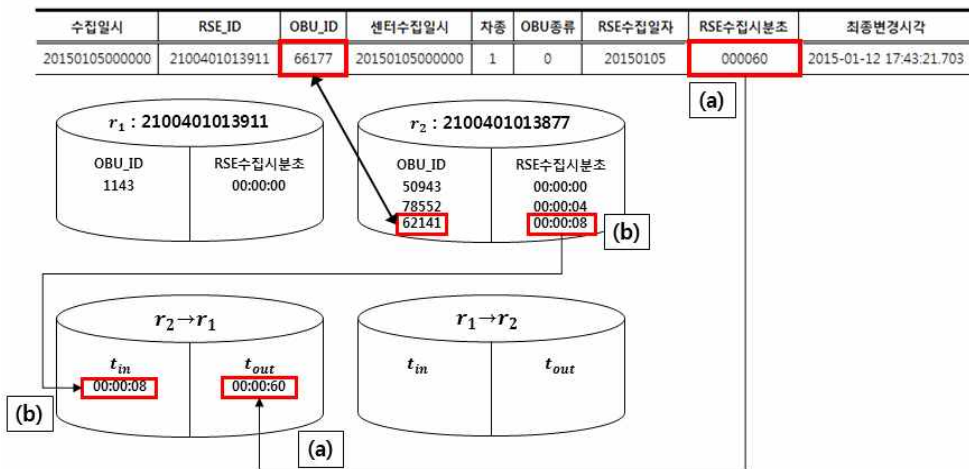
<그림 21> 매칭 정보가 존재하지 않는 경우



② 매칭 정보가 존재하는 경우

매칭 정보가 존재하면 과정 3)에서 확인된 검지지점(r_1)의 진출차량 임이 확인된다. 확인된 진출차량 정보는 방향성($r_2 \rightarrow r_1$)을 갖게 되며, 해당 정보의 검지시각은 <그림 22> (a)와 같이 진출시각으로 결정된다. 매칭된 정보(r_2 의 검지차량 기록)는 (b)와 같이 진입시각으로 결정된다. 분석대상 외 구간의 진입시각과 진출시각은 차량ID 별로 기록하여 추후 개별차량 희망주행속도 산정에 사용한다. 분석대상 구간의 진입 및 진출시각은 각 방향성 별로 기록하여 VSRI 산정을 위한 개별차량의 주행속도를 산출에 사용한다.

<그림 22> 매칭 정보가 존재하는 경우



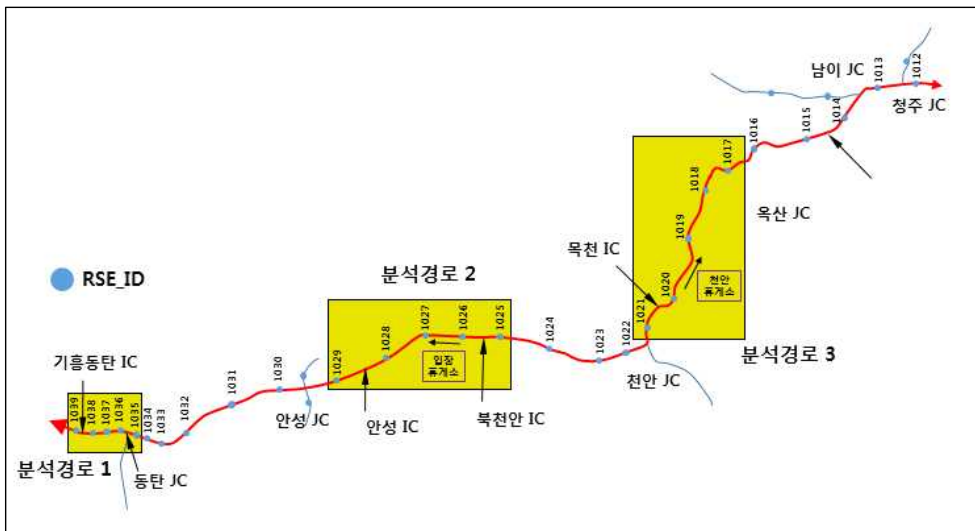
5) VSRI 산출

설정된 기준시간대 자료수집이 완료되면 III장 방법론에서 설정한 VSRI 산출과정을 수행한다. 집계된 분석대상 외 구간의 진입 및 진출시각 자료를 기반으로 차량ID 별 개별차량 희망주행속도를 산정한다. 동시에 분석대상 구간의 진입 및 진출시각 자료로 계산된 주행속도와 해당 차량의 희망주행속도를 변수로 VSRI를 산출한다.

3. 혼잡판단 및 예측

가정 2) 혼잡의 전이행태에 대한 가정에 따라 혼잡은 잇갈림구간에 서 시작함을 전제로 분석하였다. 따라서 JC 및 IC 간 기본구간이 속해있는 경로를 분석경로로 설정하였다. 본 연구에서는 <그림 23> 과 같이 3개의 분석경로를 설정하였다. 분석경로 1은 기흥동탄IC~동탄JC 로 잇갈림구간 사이 기본구간이 2개소 포함되어 있다. 분석경로 2는 안성IC~북천안IC 로 잇갈림구간 사이 기본구간이 2개소 포함되어 있으며, 1개소 상행방향(서울행)에 입장 휴게소가 포함되어 있다. 분석경로 3은 목천IC~옥산JC 로 기본구간이 2개소 포함되어 있다. 기본구간 2개소 중 1개소에 하행방향(부산행)에 천안 휴게소가 포함되어 있다.

<그림 23> 분석경로 설정



분석 대상일자는 구득한 2015년 6월을 대상으로 설정하였으며, 6월 중 혼잡이 감지되는 일자에 한하여 결과를 제시하였다. 본 연구에서는 가정 2)를 검증하기 위해 각 경로의 잇갈림구간에 혼잡이 먼저 감지되는지 여부를 분석하였다. 가정 2)에 따라 잇갈림구간에서 먼저 혼잡이 인

식 되고 상류부 기본구간의 혼잡이 인식되면 엇갈림구간-기본구간 두 구간사이 혼잡 전이속도를 도출하였다. 도출된 혼잡 전이속도를 이용해 이전 상류부의 혼잡을 미리 예측하고 해당 구간의 혼잡이 인식되었을 때 예측성능을 평가하였다.

1) 분석경로1(동탄JC - 기흥동탄IC)

엇갈림구간 사이 기본구간이 2개소 포함되어 있는 경로로 분석경로 양끝의 RSE 검지기는 알파벳으로, 내부의 RSE 검지기는 숫자로 표현하였다. 상행(서울)의 분석경로(1 → b)는 기본구간1, 기본구간2, 엇갈림구간2를 포함한다. 엇갈림구간2(3 → b)에 혼잡이 먼저 인식이 되는지 여부를 파악한 후 상류부로(기본구간2, 기본구간1)의 혼잡 전이행태를 분석하였다. 하행(부산)의 분석경로(3 → a)의 기본구간2, 기본구간1, 엇갈림구간1에 대하여 상행과 동일한 분석을 수행하였다.

<그림 24> 분석경로1(동탄JC - 기흥동탄IC)

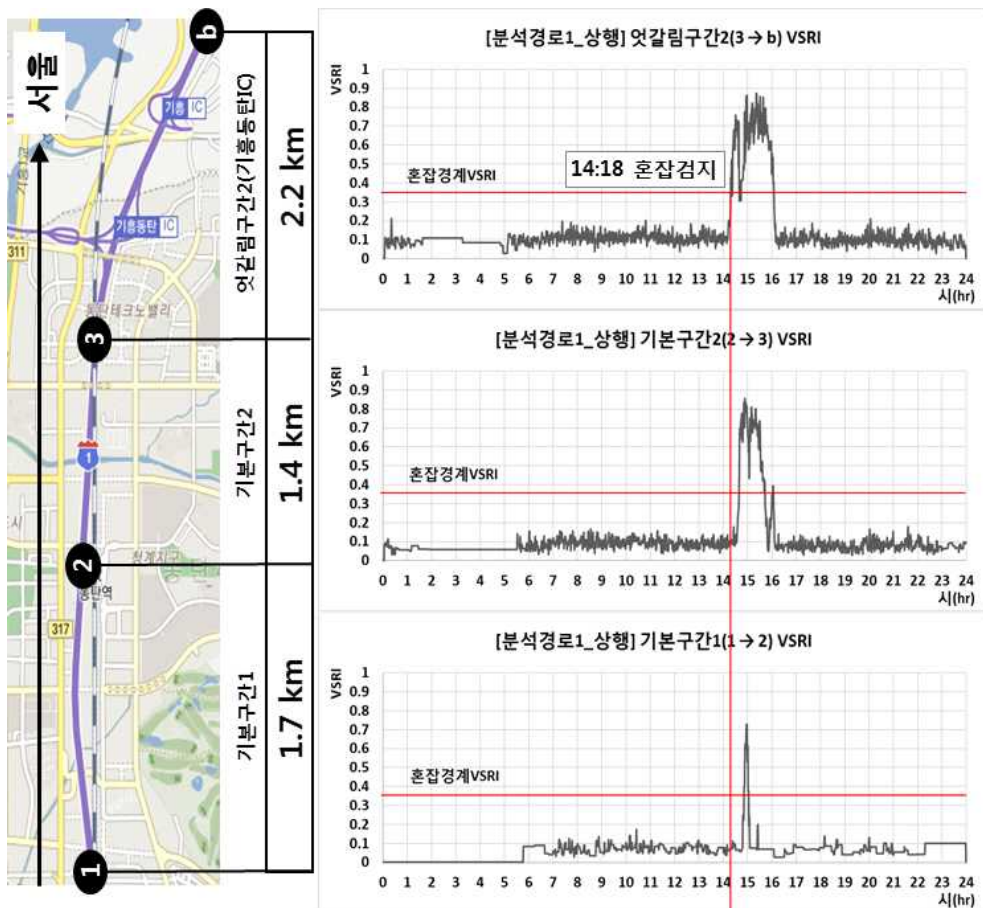


(1) 분석경로1 상행(1 → b) 분석 결과

① 가정 2) 혼잡의 전이 행태에 대한 가정의 검증

2015년 06월 01일 월요일 분석경로1 상행(1 → b)의 분석 결과 가정 2)와 같이 혼잡은 엇갈림구간에 먼저 검지되는 것으로 나타났다. 엇갈림구간2의 혼잡은 14시 18분에 발생하였으며, 상류부 기본구간2(2 → 3), 기본 구간1(1 → 2)의 혼잡은 이후 시점에 나타났다. 혼잡은 상류부로 전이되는 형태로 나타났으며, 혼잡의 강도는 점차 감소하는 것으로 분석되었다.

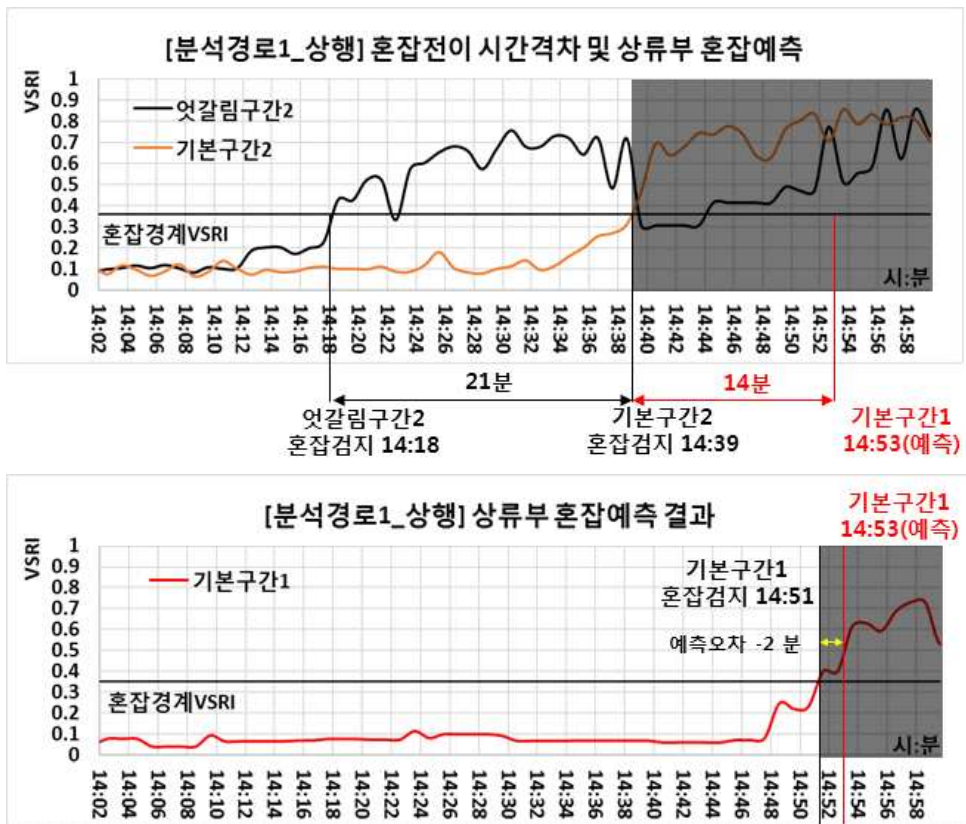
<그림 25> 혼잡검지시점 분석결과(분석경로1 상행_2015.06.01 월)



② 혼잡 전이속도 도출 및 상류부 혼잡예측

VSRI로 산출된 엇갈림구간2(3 → b)의 혼잡검지시점(14시 18분)과 상류부 기본구간2(2 → 3)의 혼잡검지시점(14시 39분)의 격차로 혼잡 전이시간을 산출하였다. 혼잡 전이시간은 21분으로, 엇갈림구간2의 구간길이 2,200m를 적용하면 본 구간의 혼잡은 약 1.75m/s의 혼잡 전이속도를 갖는 것으로 분석되었다. 따라서 이전 상류부 기본구간1(1 → 2)의 혼잡 도달 시각은 상류부 기본구간2(2 → 3) 길이 1,400m로 계산하였으며, 약 14분 후인 14시 53분 혼잡이 도달 할 것으로 예측되었다. 예측결과 이전 상류부 기본구간1(1 → 2)의 혼잡검지시각은 14시 51분으로 앞서 예측한 14시 53분에 비해 약 2분 빠르게 혼잡이 전이되었다.

<그림 26> 상류부 혼잡예측(분석경로1 상행_2015.06.01 월)

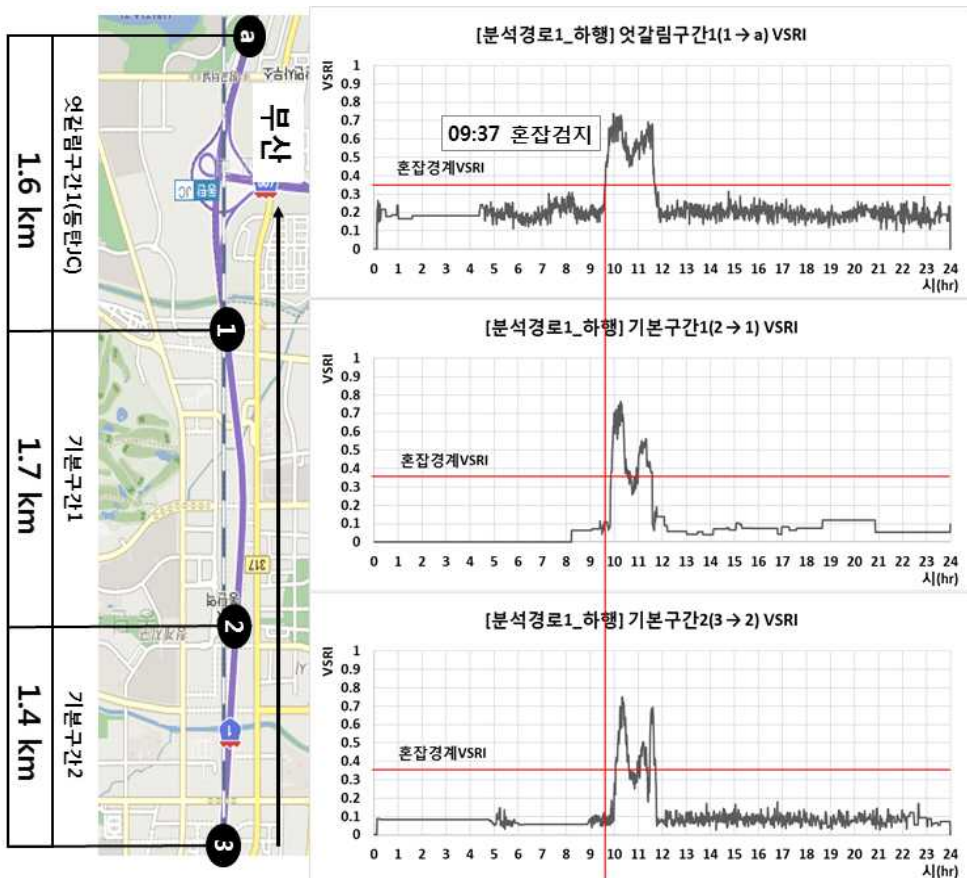


(2) 분석경로1 하행(3 → a) 분석 결과

① 가정 2) 혼잡의 전이 행태에 대한 가정의 검증

2015년 06월 01일 월요일 분석경로1 하행(3 → a)의 분석 결과 가정 2)와 같이 혼잡은 엇갈림 구간에 먼저 검지되는 것으로 나타났다. 엇갈림구간1(1 → a)의 혼잡은 09시 37분에 발생하였으며, 상류부 기본구간 1(2 → 1), 기본구간2(3 → 2)의 혼잡은 이후 시점에 나타났다. 혼잡은 상류부로 전이되는 형태로 나타났으며, 혼잡의 강도는 기본구간1(2 → 1)에서 감소하다 기본구간2(3 → 2)에서 약간 증가하는 형태로 나타났다.

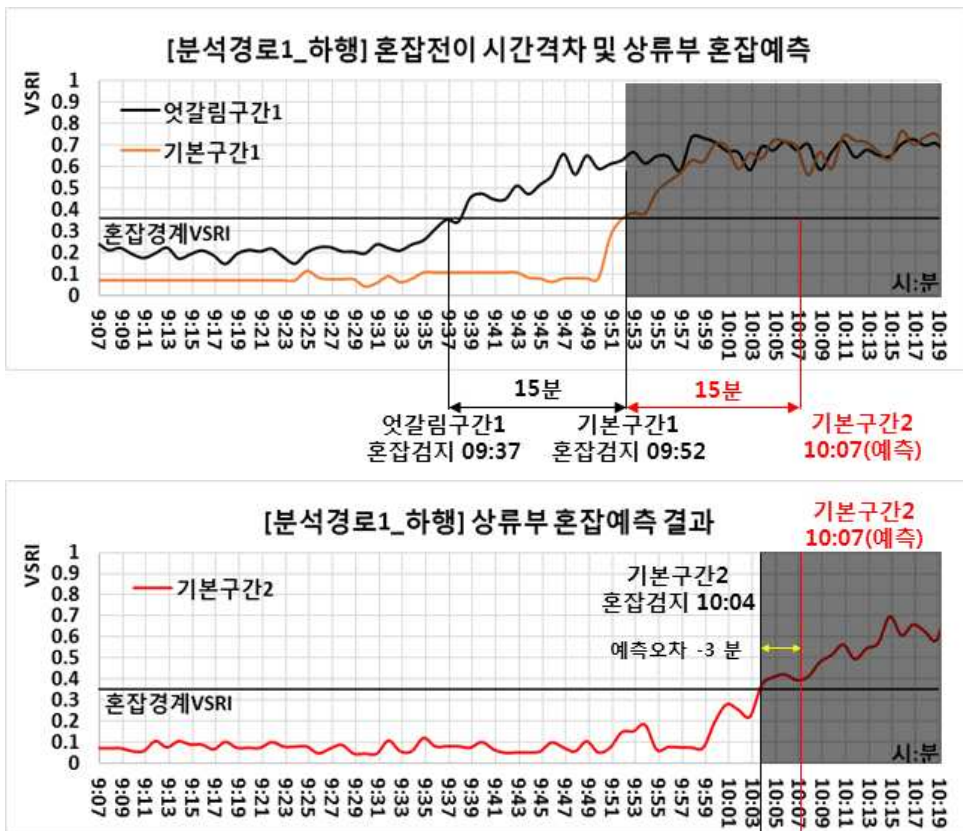
<그림 27> 혼잡검지시점 분석결과(분석경로1 하행_2015.06.01 월)



② 혼잡 전이속도 도출 및 상류부 혼잡예측

VSRI로 산출된 엇갈림구간1(1 → a)의 혼잡검지시점(09시 37분)과 상류부 기본구간1(2 → 1)의 혼잡검지시점(09시 52분)의 격차로 혼잡 전이시간을 산출하였다. 혼잡 전이시간은 15분으로, 엇갈림구간1의 구간길이 1,600m를 적용하면 본 구간의 혼잡은 약 1.78m/s의 혼잡 전이속도를 갖는 것으로 분석되었다. 따라서 이전 상류부 기본구간2(3→2)의 혼잡 도달 시각은 상류부 기본구간1(2→1) 길이 1,700m로 계산하였으며, 약 15분 후인 10시 07분 혼잡이 도달 할 것으로 예측되었다. 예측결과 이전 상류부 기본구간2(3→2)의 혼잡검지시각은 10시 04분으로 앞서 예측한 10시 07분에 비해 약 3분 빠르게 혼잡이 전이되었다.

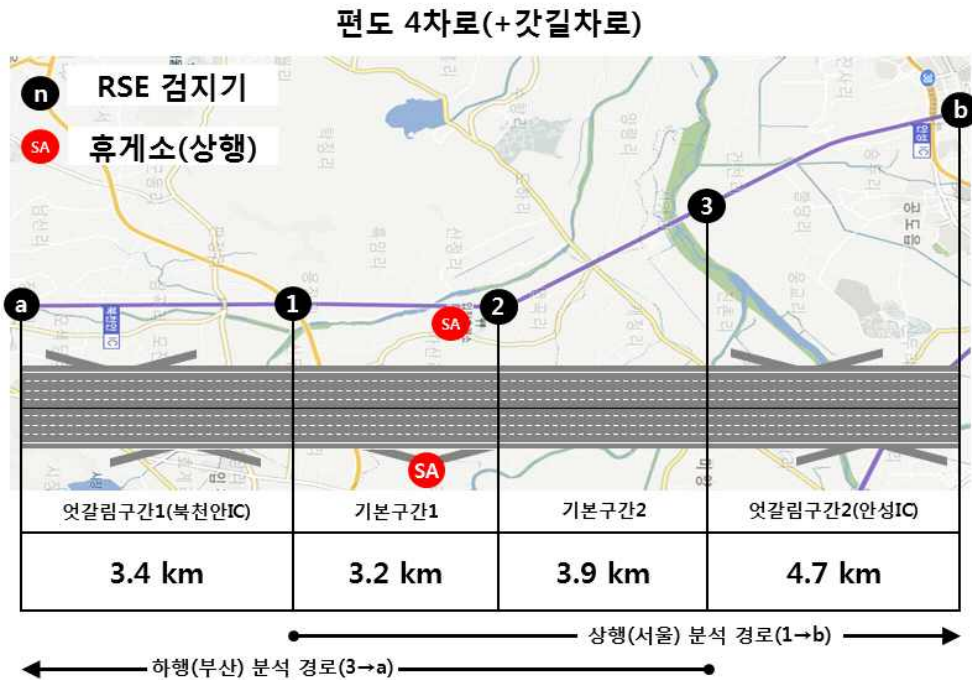
<그림 28> 상류부 혼잡예측(분석경로1 하행_2015.06.01 월)



2) 분석경로2(동탄JC - 기흥동탄IC)

엇갈림구간 사이 기본구간이 2개소 포함되어 있는 경로로 분석경로 양끝의 RSE 검지기는 알파벳으로, 내부의 RSE 검지기는 숫자로 표현하였다. 상행(서울)의 분석경로(1 → b)는 기본구간1, 기본구간2, 엇갈림구간2를 포함한다. 해당경로의 기본구간1(1 → 2)은 상행(서울)에 입장휴게소를 포함하고 있다. 혼잡의 전이 행태 가정을 검증하기 위해 엇갈림구간2(3 → b)에 혼잡이 먼저 인식이 되는지 여부를 파악한 후 상류부로(기본구간2, 기본구간1)의 혼잡 전이행태를 분석하였다. 하행(부산)의 분석경로(3 → a)의 기본구간2, 기본구간1, 엇갈림구간1에 대하여 상행과 동일한 분석을 수행하였다. 분석경로2의 총연장은 15.2km로 분석경로1 총연장 6.9km 에 비해 약 2.2배 길다. RSE 검지기 간 간격이 상대적으로 길어 혼잡예측의 오차는 다소 크게 나타났다.

<그림 29> 분석경로2(북천안IC - 안성IC)

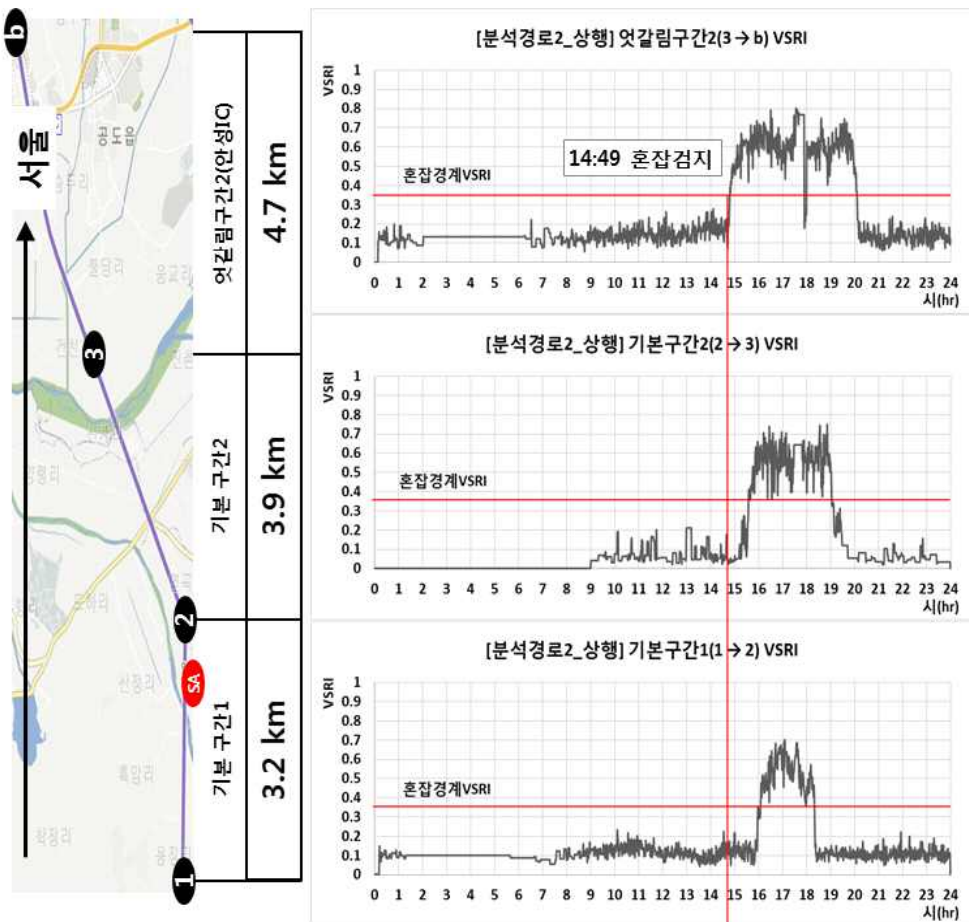


(1) 분석경로2 상행(1 → b) 분석 결과

① 가정 2) 혼잡의 전이 행태에 대한 가정의 검증

2015년 06월 28일 일요일 분석경로2 상행(1 → b)의 분석 결과 가정 2)와 같이 혼잡은 엇갈림 구간에 먼저 검지되는 것으로 나타났다. 엇갈림구간 2(3 → b)의 혼잡은 14시 49분에 발생하였으며, 상류부 기본구간2(2 → 3), 기본구간1(1 → 2)의 혼잡은 이후 시점에 나타났다. 혼잡은 상류부로 전이되는 형태로 나타났으며, 혼잡의 규모는 점차 감소하는 것으로 분석되었다.

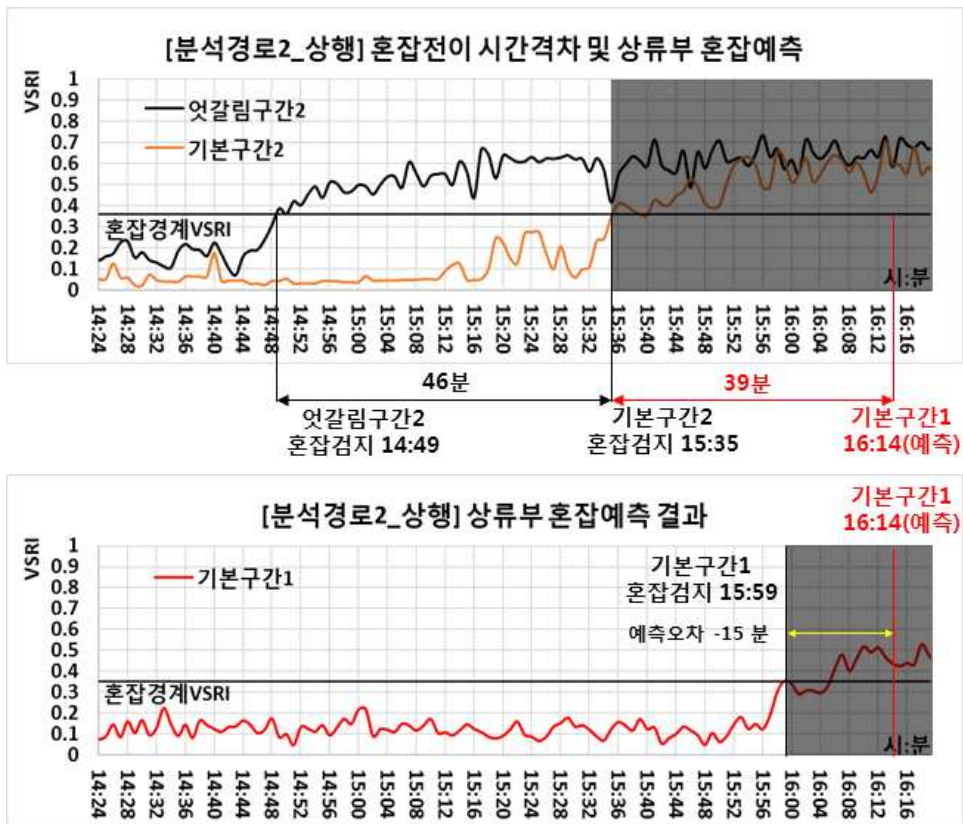
<그림 30> 혼잡검지시점 분석결과(분석경로2 상행_2015.06.28 일)



② 혼잡 전이속도 도출 및 상류부 혼잡예측

VSRI로 산출된 엇갈림구간2(3 → b)의 혼잡검지시점(14시 49분)과 상류부 기본구간2(2 → 3)의 혼잡검지시점(15시 35분)의 격차로 혼잡 전이시간은 46분으로 나타났다. 엇갈림구간2(3 → b)의 구간길이 4,700m를 적용하면 본 구간의 혼잡은 약 1.70m/s의 혼잡 전이속도를 갖는 것으로 분석되었다. 따라서 이전 상류부 기본구간1(1 → 2)의 혼잡 도달 시각은 상류부 기본구간2(2 → 3) 길이 3,900m 로 계산되며, 약 39분 후인 16시 14분 경 혼잡이 도달 할 것으로 예측되었다. 예측결과 이전 상류부 기본구간1(1 → 2)의 혼잡검지시각은 15시 59분으로 앞서 예측한 16시 14분에 비해 약 15분 빠르게 혼잡이 전이되었다.

<그림 31> 상류부 혼잡예측(분석경로2 상행_2015.06.28 일)

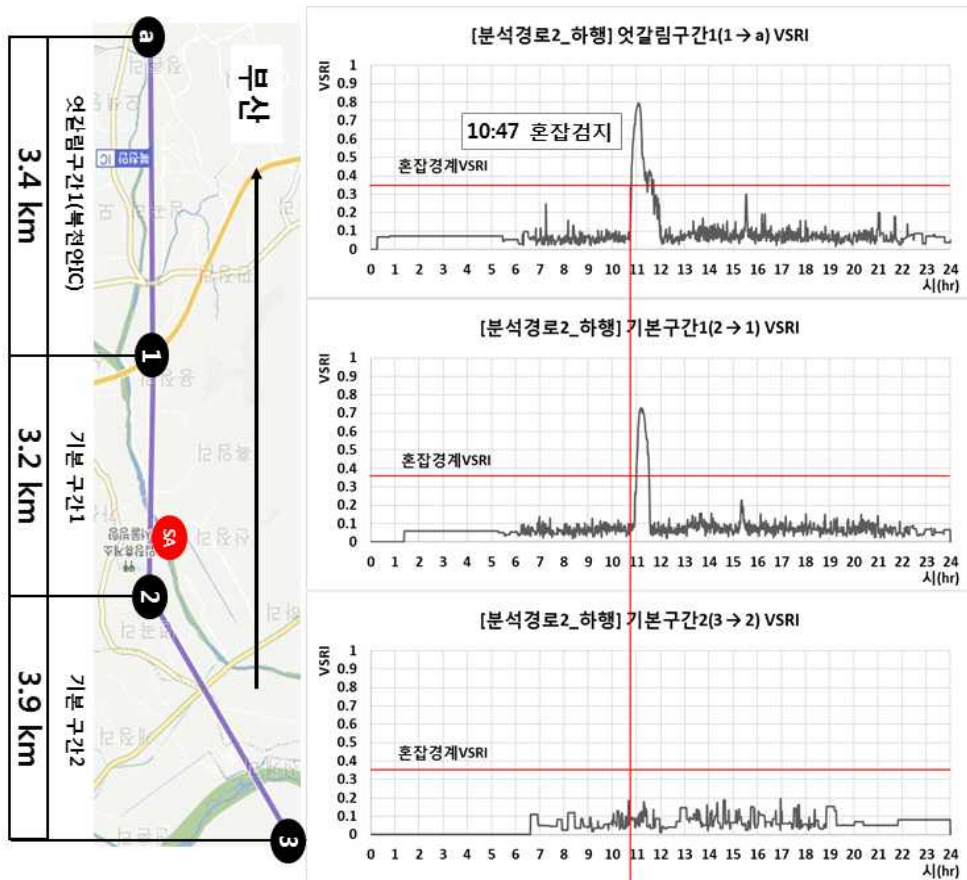


(2) 분석경로2 하행(3 → a) 분석 결과

① 가정 2) 혼잡의 전이 행태에 대한 가정의 검증

2015년 06월 09일 화요일 경로2 하행(3 → a)의 분석 결과 가정 2)와 같이 혼잡은 엇갈림 구간에 먼저 검지되는 것으로 나타났다. 엇갈림구간 1(1 → a)의 혼잡은 10시 47분에 발생하였으며, 상류부 기본구간1(2 → 1)의 혼잡은 이후 시점에 나타났다. 이전 상류부 기본구간2(3 → 2)의 혼잡은 발생되지 않은 것으로 나타났다. 혼잡은 상류부로 전이되다 기본구간1(2 → 1)에서 혼잡이 해소되는 것으로 나타났다.

<그림 32> 혼잡검지시점 분석결과(분석경로2 하행_2015.06.09 화)



3) 분석경로3(옥산JC - 목천IC)

엇갈림구간 사이 기본구간이 2개소 포함되어 있는 경로로 분석경로 양끝의 RSE 검지기는 알파벳으로, 내부의 RSE 검지기는 숫자로 표현하였다. 상행(서울)의 분석경로(1 → b)는 기본구간1, 기본구간2, 엇갈림구간2를 포함한다. 엇갈림구간2(3 → b)에 혼잡이 먼저 인식이 되는지 여부를 파악한 후 상류부로(기본구간2, 기본구간1)의 혼잡 전이행태를 분석하였다. 하행(부산)의 분석경로(3 → a)는 기본구간2, 기본구간1, 엇갈림구간1을 포함하며, 해당경로의 기본구간2(3 → 2)는 하행(부산)에 천안휴게소를 포함하고 있다. 분석경로3의 총연장은 17.0km로 분석경로1 총연장 6.9km, 분석경로2 총연장 15.2km로 가장 긴 간격으로 RSE 검지기가 설치되어 있다. 특히 기본구간의 연장이 4.5km, 5.6km로 타 분석경로 기본구간 연장(1.4km~4km)에 비해 길어 대부분의 혼잡이 구간 내에서 소멸되는 것으로 나타났다.

<그림 33> 분석경로3(옥산JC - 목천IC)

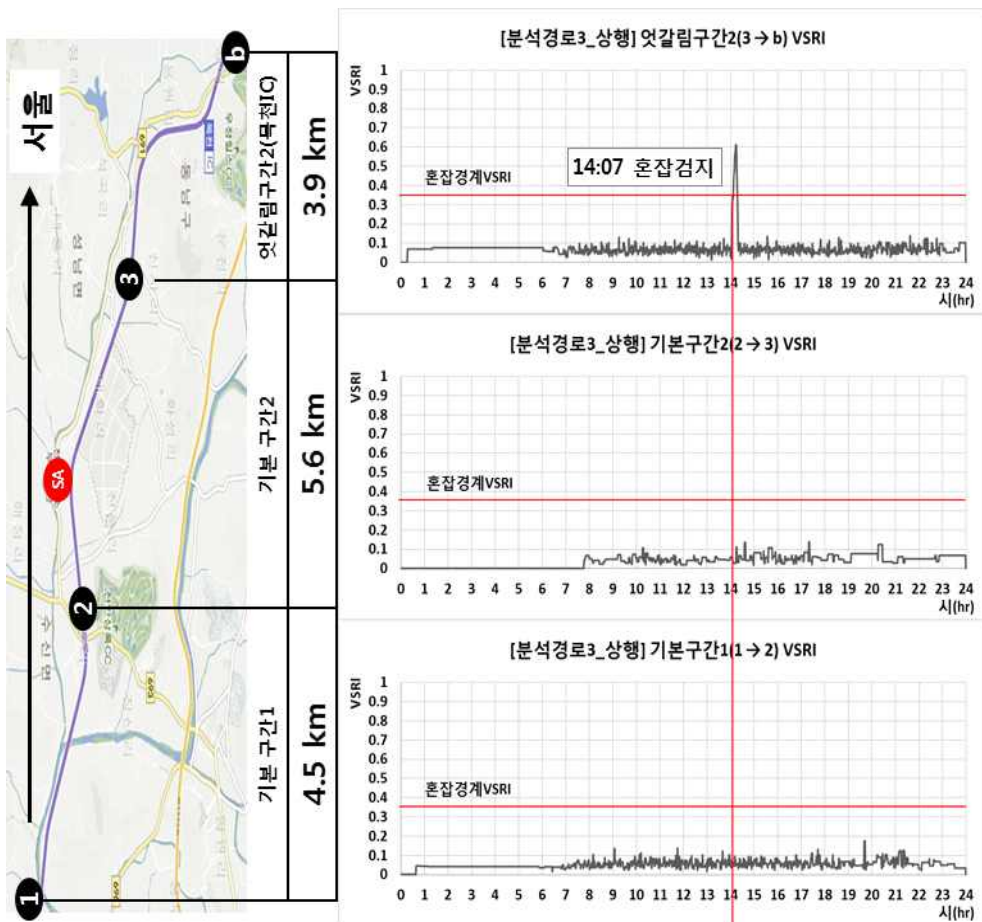


(1) 분석경로3 상행(1 → b) 분석 결과

① 가정 2) 혼잡의 전이 행태에 대한 가정의 검증

2015년 06월 28일 일요일 경로3 상행(1 → b)의 분석 결과 가정 2)와 같이 혼잡은 엇갈림 구간에 먼저 검지되는 것으로 나타났다. 엇갈림 구간2(3 → b)의 혼잡은 14시 07분에 발생하였다. 구간2(3 → b)의 혼잡은 해당구간 내에서 혼잡이 해소되어 상류부로의 혼잡 전이 행태는 보이지 않는 것으로 나타났다.

<그림 34> 혼잡검지시점 분석결과(분석경로3 상행_2015.06.16 목)

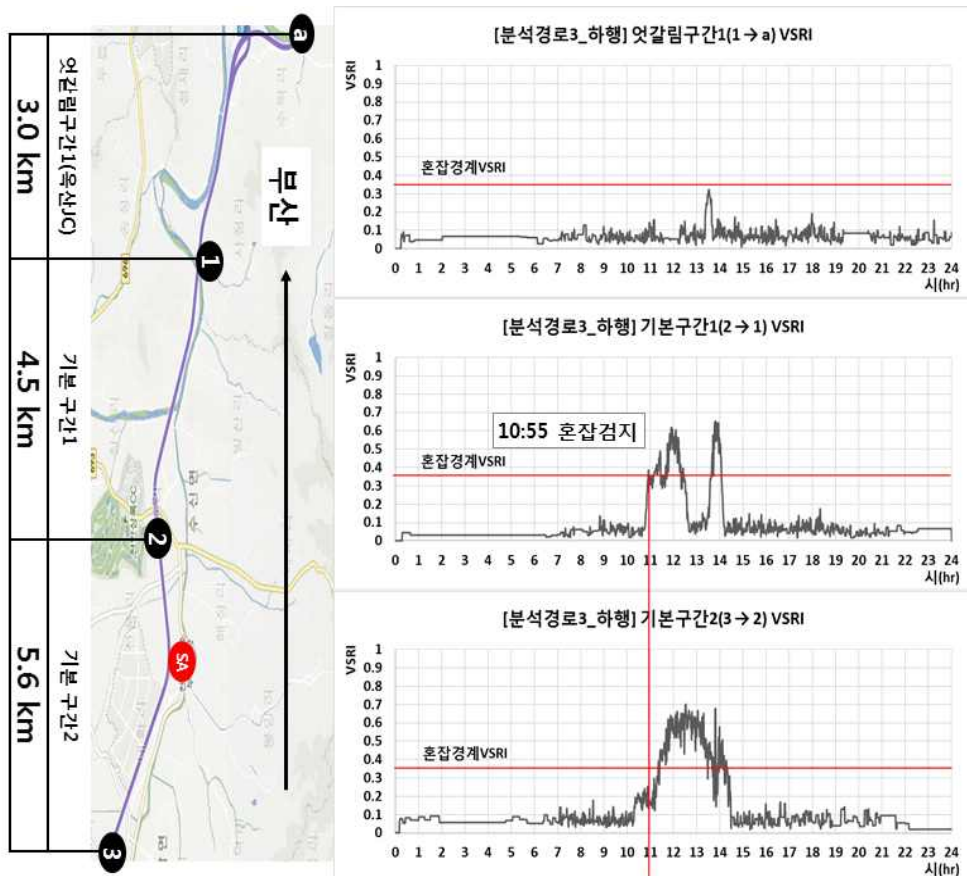


(2) 분석경로3 하행(3 → a) 분석 결과

① 가정 2) 혼잡의 전이 행태에 대한 가정의 검증

2015년 06월 09일 화요일 경로2 하행(3 → a)의 분석 결과 가정 2)와 다르게 기본구간에서 혼잡이 먼저 검지되었다. 엇갈림구간의 혼잡전이 없이 기본구간1(2 → 1)에 혼잡이 먼저 검지된 이유는 해당구간에 발생한 사고 여파로 판단된다. 사고 여파로 발생한 혼잡은 상류부 기본구간 2(3 → 2)로 전이되는 행태로 나타났다. 반면 하류부 엇갈림구간1(1 → a)에서는 해당시간대 혼잡이 발생되지 않은 것으로 분석되었다.

<그림 35> 혼잡검지시점 분석결과(분석경로3 하행_2015.06.30 화)



VI. 결론

1. 결론

정보통신기술의 발달로 실시간 데이터 수집과 대용량 데이터의 처리가 발전해 가면서 실시간으로 소통상황을 모니터링 할 수 있는 지표의 개발은 꾸준히 수행되고 있다. 소통상황 및 혼잡 판단을 위해 일반적으로 밀도, 속도, 교통량의 단일 지표 사용 또는 지표의 조합 식을 사용하고 있다. 본 연구에서 사용한 자료는 구간검지 시스템인 DSRC 자료로 구간검지의 특성을 고려하여 지표를 개발하였다. 구간검지 자료는 연속적인 소통상황을 파악할 수 있고, 고속도로 전역을 모니터링 할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 구간에서 검지되는 차량은 특정 OBU를 장착한 차량으로 구득되는 자료는 표본의 자료다. 본 연구에서 사용한 구간검지 시스템 자료(DSRC)는 표본의 자료로서 표본율에 가장 적은 영향을 받는 통행시간 기반의 속도 지표를 사용하였다. 일반적으로 사용하는 속도 지표는 개별차량들의 평균주행속도로서 개별차량의 주행행태를 고려할 수 없다. 따라서 주행행태가 일정하지 않은 차량들이 혼재 될수록 일반적인 속도지표는 구간의 실제 소통상황을 반영할 수 없다. 이 같은 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 각 개별차량의 주행행태를 대표할 수 있는 희망주행속도 개념을 적용한 실시간 혼잡판단 지표를 개발하였다.

본 연구에서 개발한 실시간 혼잡판단지표인 VSRI는 개별차량의 주행행태에 따라 산출되어 버스, 화물차, 저속주행차량의 구성비에 관계없이 일정한 수준 상태의 혼잡을 검지 할 수 있다. 특히 구간의 연속적인 소통상황을 표현 할 수 있고, 구간에 따른 혼잡의 행태 분석이 가능하며, 고속도로 전역에 적용 가능하다는 장점이 있다. VSRI는 0~1의 값을 가지며, 1에 가까울수록 혼잡의 강도는 크며, 0에 가까울수록 구간의 소통상황은 양호한 것으로 판단한다. 본 연구에서는 VSRI의 혼잡경계 값을

로 도로용량편람의 서비스 수준 C에 해당하는 0.35를 사용하였다. 본 연구의 지표의 기준 및 경계 설정에서 제시한 방법은 혼잡관리 목표 수준에 따라 경계값 산출이 가능하도록 제시하였다. 본 연구에서 제시한 실시간 혼잡판단 알고리즘은 실제 시스템 적용을 고려하여 연산시간을 최소화할 수 있는 방법으로 설계하였다. 36개 구간을 영향권으로 1일 1분 기준 시간대(1440개) 분석 결과 Intel(R) Core(TM) i5-7400 CPU 3.00 GHz 16.0GB RAM 기준 약 120초의 연산시간이 소요되었다. 2015년 기준 전국 고속도로 본선구간 RSE 검지기는 총 909개로 1분 기준 고속도로 전 구간의 실시간 혼잡판단 알고리즘 연산시간은 약 2.44초로 예상된다.

본 연구에서 구축한 VSRI의 성능을 평가하기 위해 경부 고속도로 양재JC-청주JC 총 36개 구간을 영향권으로 3개의 분석경로를 분석하였다. 분석결과 연구에서 설정한 가정과 같이 혼잡은 대부분 엇갈림구간에서 먼저 발생하는 것으로 나타났다. 특히 엇갈림구간에서 발생한 혼잡은 상류부 기본구간으로 전이 되는 것으로 분석되었다. 엇갈림구간의 혼잡 검지시점과 상류부 기본구간의 혼잡검지시점으로 산출한 혼잡전이 속도를 적용하여 이전 기본구간의 혼잡을 예측하였다. 예측결과 대부분 예측시점보다 해당 기본구간의 혼잡이 빨리 검지되는 것으로 나타났으며, RSE 검지기 설치간격(분석구간 길이)이 길수록 그 정도는 큰 것으로 나타났다. 이는 혼잡이 발생되어 해소되기 전까지 상류부로 전이되는 혼잡의 전이속도는 증가되기 때문으로 판단된다. 특히 검지기의 위치가 균일하지 않고, 상대적으로 길게 설치되어 있어 상류부 기본구간에서 발생할 혼잡시점의 예측 정확도는 구간의 길이가 길수록 감소한다. 만약, RSE 검지기의 위치가 균일하고 검지기의 간격이 조밀 하다면 혼잡전이의 예측 정확도는 높아질 것으로 판단된다. 구간별 혼잡 전이속도, 혼잡전이의 소멸 과정, 혼잡 전이의 증폭과정, 등 혼잡과 관련된 현상을 다각적으로 분석하기 위해서는 보다 균일하고 조밀한 간격으로 검지기를 설치해야 할 것이다.

혼잡은 크게 두 가지 원인으로 발생하게 된다. 첫째, JC·IC 등 엇갈림구간에서 차량간섭으로 인해 혼잡이 발생하게 된다. 이 경우 엇갈림구간에서 발생한 혼잡의 여파로 인해 상류부 기본구간으로 혼잡이 전이될 가능성이 있다. 즉, 엇갈림구간에서 VSRI로 혼잡을 인식하면 상류부 기본구간 및 상류부 엇갈림구간에 대한 혼잡대응관리를 수행해야 한다. 적절한 대응을 수행한다면 상류부 기본구간의 혼잡은 나타나지 않을 것이다. 적절한 대응에도 불구하고 기본구간에서 VSRI로 혼잡이 인식되면 혼잡 발생 시간적 격차(혼잡 전이시간)를 기반으로 상류부의 혼잡을 예측할 수 있다. 둘째, 공사·사고 등으로 인한 차로감소로 혼잡이 발생할 수 있다. 만약, 기본 구간에 사고가 일어나 혼잡이 발생하면 엇갈림구간으로부터 혼잡 전이양상 없이 기본구간의 혼잡이 먼저 나타날 것이다. 즉, 기본 구간의 혼잡 검지시 하류부 혼잡이 검지되지 않았다면 기본 구간 내에서 발생한 혼잡으로 판단할 수 있다. 기본 구간은 차량의 합·분류가 존재 하지 않아 혼잡이 발생한 원인은 공사·사고 등 특수한 상황으로 인해 일어났을 가능성이 높다.

현재 고속도로 혼잡관리 운영은 지점검지 체계로 수집된 자료에 의존하고 있는 실정이다. 구간단위의 혼잡관리 및 고속도로 전역을 영향권으로 설정하기 위해서는 구간검지 체계의 활용이 필요하다. 본 연구에서는 구간검지 체계로 수집된 자료를 통해 시스템이 혼잡을 인식할 수 있는 지표와 그 활용방안을 제시하였다. 본 연구에서 구축한 VSRI 기반 실시간 혼잡판단 알고리즘은 적절한 혼잡 인식 및 관리를 가능하게 할 것으로 기대된다.

2. 연구의 시사점 및 한계점

혼잡은 구간의 특성과 해당 구간을 주행하는 운전자의 주행 특성에 따라 다르게 나타난다. 따라서 혼잡의 절대적인 기준을 정하는 것은 다

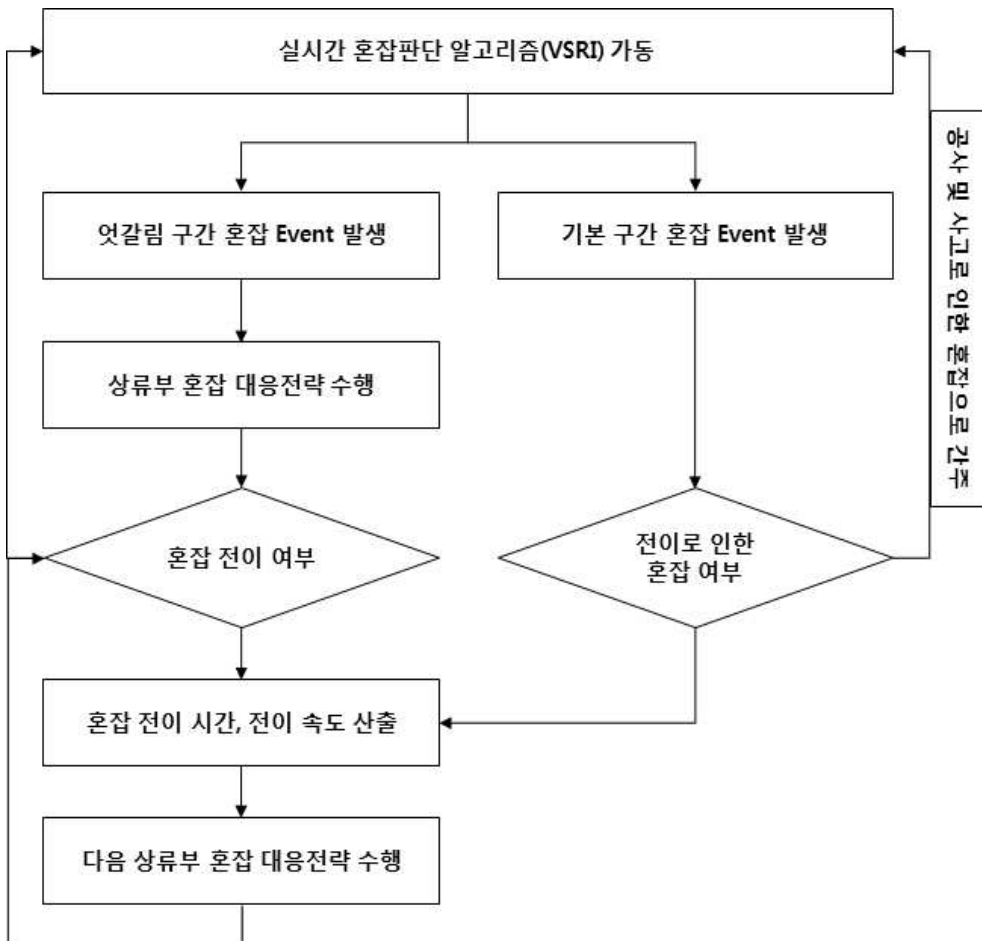
소 무리가 있다. 본 연구에서는 보다 실제 구간의 소통상황을 대표 할 수 있는 혼잡지표를 제안하였다. 본 연구에서의 혼잡은 ‘개별차량의 희망 주행속도 기준 대비 현재 주행중인 구간의 속도 감소율이 일정수준 이상인 상태’로 정의하였다. 정의에 따라 개별차량의 주행특성을 고려한 지표를 개발하였으며, 혼잡관리 목표 수준에 따른 경계값 산출 방법론을 제시하였다. 본 연구는 최초로 구간검지 시스템인 DSRC 자료를 활용하여 구간의 혼잡을 실시간으로 판단하고 연속적인 혼잡의 전이행태를 데이터 기반으로 분석한 연구로서 그 의의가 크다. 특히 방향성이 불명확한 수집데이터를 이용하여 실시간 시스템에 적용이 가능한 알고리즘을 개발했다는 데 큰 의의가 있다. 본 연구에서 제시한 알고리즘은 고속도로 혼잡 운영관리의 방안을 더욱 고도화할 수 있는 발판이 될 것으로 기대된다.

본 연구에서 사용한 자료는 표본의 자료인 DSRC자료로 표본율에 따라 교통량 및 밀도 등 차량대수와 직접적인 연관을 갖는 지표의 사용을 배제하였다. 향후 DSRC의 검지율이 100%에 도달 한다면 속도지표 뿐만 아니라 교통량, 밀도, 구간점유율 등 다양한 지표를 활용하여 개선된 혼잡판단 지표를 개발할 수 있을 것으로 판단된다. 현재 DSRC 수집 시스템 검지기는 엇갈림구간 사이 기본 구간이 2~3개소로 구성되어 있다. 따라서 엇갈림구간과 상류부 기본구간의 혼잡 검지를 통한 혼잡 전이를 활용할 구간이 적은 실정이다. 특히 검지기 설치 간격이 길고 균일하지 못해 다각적인 혼잡특성 분석을 수행하기 어렵다는 한계가 있다. GPS 자료는 좌표형 검지 자료로서 검지지점을 자유롭게 설정할 수 있다. GPS 자료의 설정 검지지점 간격을 다양하게 분석한다면 적정 검지기 설치 간격을 도출할 수 있을 것으로 판단되며, 추후 개발도상국에 DSRC 시스템 기술의 수출시 경쟁력을 제고 할 것으로 판단된다.

3. 연구의 향후 활용방안

본 연구에서 제안한 혼잡판단 지표인 VSRI를 적용해 실시간 혼잡판단 및 모니터링이 가능한 실시간 혼잡관리 모니터링 시스템을 다음과 같이 제안한다. 본 시스템은 실시간 수집 자료를 통해 VSRI를 산출하는 실시간 혼잡판단 알고리즘과 연동되어 수행되며 <그림 36>과 같다.

<그림 36> 실시간 혼잡관리 모니터링 시스템



1) 실시간 혼잡판단 알고리즘(VSRI) 가동

본 연구에서 제시한 실시간 혼잡판단 알고리즘을 고속도로 전역(RSE 검지기 설치지점 909개소)을 영향권으로 가동한다. 혼잡관리 목표 수준에 따라 특정 구간에 혼잡이 검지되면 해당 구간의 속성(엇갈림구간, 기본구간)별로 다음과 같은 과정을 수행한다.

2) 엇갈림구간 혼잡 발생

엇갈림구간에 혼잡이 검지된 경우 상류부 및 하류부 혼잡 대응전략을 수행한다. 대응전략에는 가변차로 개방, VMS를 통한 우회 경로정보 제공 등이 있다. 차량의 가변차로 이용 및 우회를 통한 대응전략이 성공하면 상류부 기본구간에 혼잡은 발생되지 않을 것이다. 대응전략에도 불구하고 상류부 기본구간에 혼잡이 발생되면 엇갈림구간의 혼잡검지시각, 상류부 기본구간의 혼잡검지시각을 이용해 혼잡 전이시간 및 전이속도를 산출한다. 산출한 혼잡 전이속도로 다음 상류부의 혼잡전이 시각을 예측하고 해당 시각에 해당 구간을 통행할 예정인 차량에 정보를 제공하여 우회를 유도한다.

3) 기본구간 혼잡 발생

기본구간에 혼잡이 검지된 경우 하류부 혼잡으로 인해 전이된 혼잡, 하류부 혼잡 없이 발생한 혼잡 두 가지 상황이 존재한다. 하류부 혼잡으로 인해 전이된 혼잡은 2) 엇갈림구간 혼잡 발생 경우의 혼잡 전이속도를 산출하여 다음 상류부의 혼잡전이 시각을 예측한다. 하류부 혼잡 없이 발생한 혼잡은 혼잡의 전이 없이 기본 구간에 혼잡이 먼저 발생한 경우로 공사 및 사고 상황으로 간주하여 적절한 대응전략을 수행한다.

■ 참고문헌

- 국토연구원(1997). 「도로교통혼잡지표 개발에 관한 연구」
- 국토해양부(2013). 「도로용량편람」
- 북기찬, 이승준, 최윤희, 강정규, & 이승환. (2009). 고속도로 소통상태지수 개발에 관한 연구. *대한교통학회지*, 27, 85-95.
- 서형일, 조준한, 김성호, & 문병섭. (2011). 도시부도로 혼잡판단지표 개발에 관한 연구. *대한교통학회 학술대회지*, 65, 605-610.
- Altintasi, O., Tuydes-Yaman, H., & Tuncay, K. (2017). Detection of urban traffic patterns from Floating Car Data (FCD). *Transportation Research Procedia*, 22, 382-391.
- Anbaroglu, B., Heydecker, B., & Cheng, T. (2014). Spatio-temporal clustering for non-recurrent traffic congestion detection on urban road networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 48, 47-65.
- Chen, C., Jia, Z., & Varaiya, P. (2001). Causes and cures of highway congestion. *IEEE control systems*, 21(6), 26-32.
- Cottrell, W.D. (1991). Measurement of the extent and duration of traffic congestion in urban areas. In Proceedings of the 61st Annual Meeting, *Institute of Transportation Engineers*. 427-432.
- D'Andrea, E., & Marcelloni, F. (2017). Detection of traffic congestion and incidents from GPS trace analysis. *Expert Systems with Applications*, 73, 43-56.
- Lindley, J. A. (1986). Quantification of urban freeway congestion and analysis of remedial measures. Final report (No. FHWA/RD - 87/052)

- Lomax, T. J. (1997). Quantifying congestion (No. 398). *Transportation Research Board*.
- Schrank, D. L., & Lomax, T. J. (1997). URBAN ROADWAY CONGESTION-1982 TO 1994. VOLUME 1: ANNUAL REPORT(No. FHWA/TX - 98 / 1131 - 9).
- Schrank, D. L., Turner, S., & Lomax, T. J. (1993). Estimates of urban roadway congestion, 1990.
- Schrank, D., & Lomax, T. (2003). The 2003 annual urban mobility report. *Texas Transportation Institute, Texas A&M University*.
- Thurgood, G. S., and Taylor, T. J. (1994). Strategies to reduce recurring interstate congestion: A freeway congestion index(FCI). *Rep. No. UT-94.06, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Brigham Young Univ., Provo, Utah*. V
- Wang, Q., Wan, J., & Yuan, Y. (2017). Locality constraint distance metric learning for traffic congestion detection. *Pattern Recognition* (PR), DOI: 10.1016
- Wei, L., & Hong-ying, D. (2016). Real-time road congestion detection based on image texture analysis. *Procedia Engineering*, 137, 196-201.